

Mémoire pour l'obtention de

L'Habilitation à Diriger des Recherches

VERS UNE ECOLOGIE TERRITORIALE DES RESIDUS ORGANIQUES



Tom WASSENAAR

UPR CIRAD Recyclage et Risque

Présenté et soutenu publiquement le 12 juin 2018 devant le jury composé de

Muriel TICHIT, Directeur de recherche, INRA/AgroParisTech

Bernard HUBERT, Directeur de recherche, INRA

Thomas NESME, Professeur, Bordeaux Sciences Agro

Guillaume JUNQUA, Enseignant-Chercheur HDR, IMT Mines Alès

Patrick CARON, Chercheur HDR, CIRAD

président du jury

rapporteur

rapporteur

examineur

examineur

Excusée lors de la soutenance :

Catherine FIGUIÈRE, Maître de conférences HDR, Université Grenoble Alpes

rapporteur

Photo de couverture : Des collecteurs de « *night soil* » vident leurs chariots sur la terre d'épandage.
Photo prise en Angleterre aux alentours de 1870. © Hull City Council, Hull Public Health Department Photograph.

Pour calfater vraiment, tu dois entrer dans la fente en même temps que la fibre, devenir toi-même la fibre du cai tram, avec ses yeux à elle. Si tu réussis, tu verras comment l'eau essaiera d'entrer, parce que tu auras aussi les mêmes yeux que l'eau.

- le père de Hao

Tamata et l'Alliance, Bernard Moitessier

SOMMAIRE

I. PRESENTATION DU CANDIDAT	1
A. RESUME DU PARCOURS PROFESSIONNEL	3
B. CURRICULUM VITAE	9
C. LISTE DES PUBLICATIONS	13
1. <i>Articles dans revues à comité de lecture</i>	13
2. <i>Proceedings à comité de lecture</i>	15
3. <i>Ouvrages et chapitres d'ouvrages</i>	16
4. <i>Communications à des congrès et colloques</i>	17
5. <i>Posters</i>	18
6. <i>Rapports</i>	18
7. <i>Logiciels enregistrés</i>	19
8. <i>Indicateurs bibliométriques</i>	20
D. TRAVAUX ENCADRES	21
1. <i>Thèses de doctorat (encadrement)</i>	21
2. <i>Plan de compagnonnage</i>	21
3. <i>Mémoires de stages niveau M2</i>	21
4. <i>Mémoires de stages niveau M1</i>	22
5. <i>Supervision de sous-traitance</i>	22
II. MEMOIRE DES TRAVAUX DE RECHERCHE	23
A. INTRODUCTION : UN POSITIONNEMENT EVOLUTIF	25
B. RECHERCHES D'OBSERVATION, FOURNISSEUR D'INFORMATIONS TERRITORIALES EN MILIEU AGRICOLE	29
1. <i>Télédétection de la surface du sol sous culture pérenne</i>	30
2. <i>La détection semi-automatique d'objets végétaux dans l'imagerie à très haute résolution de paysages agricoles</i>	33
a) <i>La détection d'arbres de verger</i>	33
b) <i>La détection de haies dans le paysage agricole</i>	36
3. <i>La classification spectrale automatique d'imagerie à haute résolution</i>	38
4. <i>Estimation de l'évapotranspiration par télédétection à moyenne résolution</i>	41
5. <i>Regard critique sur ce parcours en recherches d'observation</i>	42
C. ANALYSE ET MODELISATION DE RELATIONS AGRICULTURE – ENVIRONNEMENT, A L'ECHELLE REGIONALE ET AU-DELA : DES DIAGNOSTICS POUR CIBLER L'ACTION TERRITORIALE	45
1. <i>La modélisation de l'impact du changement climatique sur la croissance de cultures à l'échelle régionale</i>	45
2. <i>La modélisation et la projection de changements d'occupation du sol dans les Néotropiques</i>	46
3. <i>L'estimation du rôle du secteur de l'élevage dans les changements environnementaux</i>	49
a) <i>Révéler les transitions au sein du secteur de l'élevage</i>	49
b) <i>Le rôle du secteur de l'élevage dans les changements environnementaux globaux</i>	52
c) <i>La contribution de l'élevage aux émissions de GES de l'Union Européenne</i>	58
4. <i>Regard critique sur ce parcours en diagnostics régionaux et globaux de relations agriculture – environnement</i>	60
D. LA MODELISATION PROSPECTIVE DU RECYCLAGE TERRITORIAL DE RESIDUS ORGANIQUES	61
1. <i>La gestion intégrée des résidus organiques d'un territoire par la construction de scénarios pour leur retour au sol</i>	64
a) <i>Le positionnement collectif de notre unité de recherche face à l'ambition de contribuer à l'identification de solutions aux problèmes que posent les résidus organiques</i>	65
b) <i>La co-construction de solutions par recyclage agricole territoriale</i>	67
2. <i>L'estimation de conséquences environnementales pour éclairer la prise de décision</i>	72

a)	La conception d'un cadre pour informer la co-construction des possibles conséquences environnementales	72
b)	L'estimation des conséquences des scénarios : les cas de la contribution au changement climatique, des éléments trace et des contaminants organiques.....	77
E.	CONCLUSION : LE RECYCLAGE TERRITORIAL VU COMME ECOLOGIE INDUSTRIELLE	83
III.	PERSPECTIVES DE RECHERCHE	87
A.	LE CHOIX D'UNE POSTURE EPISTEMOLOGIQUE POUR LA SYMBIOSE INDUSTRIELLE ET SON EVALUATION ENVIRONNEMENTALE	89
1.	<i>Eviter l'inévitable dichotomie Nature – Société.....</i>	<i>90</i>
2.	<i>Une proposition matérialiste et pragmatique pour aller de l'avant.....</i>	<i>100</i>
a)	Repenser les catégories	102
b)	La recherche « intégrée » projetée sur cette classification des catégories.....	107
c)	L'écologie industrielle projetée sur cette classification des catégories	110
d)	L'évaluation environnementale projetée sur cette classification des catégories	113
e)	Le pragmatisme : un dernier élément de posture résultant de l'analyse	114
B.	PROBLEMATIQUE ET OBJECTIFS DE RECHERCHE	119
1.	<i>Proposition d'objet(s).....</i>	<i>121</i>
a)	Cadrage conceptuel.....	121
b)	Cadrage thématique : vous avez dit « matière » ?	124
c)	Cadrage thématique : upscaling du système d'action ?	128
d)	Cadrage géographique : outscaling vers où ?.....	133
2.	<i>Proposition de méthode.....</i>	<i>135</i>
a)	Co-construction	135
b)	Modélisation et simulation dynamique de flux.....	141
c)	« Evaluation » ?	147
d)	Remarques sur les modalités pratiques de mise en œuvre	154
C.	CONCLUSION.....	157
BIBLIOGRAPHIE		161

I. Présentation du candidat

A. Résumé du parcours professionnel

Les parcours « diversifiés » se laissent difficilement capter sous un simple titre bref et clair. Je reviendrai sur le titre principal vers la fin de cette thèse, mais je tiens à m'excuser à ceux arrivant ici avec l'espoir qu'il s'agisse d'une monographie dédiée au sujet que ce titre annonce : si j'espère qu'en persévérant vous y trouverez votre compte, il s'agit surtout d'une candidature HDR, et donc d'une synthèse de mon parcours de recherche. Le premier mot du titre fait allusion à cette notion de parcours. La seconde partie de cette thèse résume les fruits de ce parcours. Afin de mieux comprendre l'enchaînement de ces travaux, mais aussi le chercheur que je suis aujourd'hui ainsi que mes ambitions pour la suite, j'estime utile de résumer de manière factuelle le parcours humain qui sous-tend tout cela.

Il me semble que le parcours d'un chercheur peut être décomposé en deux dimensions « fondamentales », orthogonales : une première serait celle de la maîtrise progressive de la connaissance et de son acquisition ; la dimension « expert » en quelque sorte, qui emmène à la spécialisation. Le parcours intellectuel constituerait une seconde dimension, celle de « scrutateur ». Il s'agirait du développement d'une curiosité qui emmène à élargir son cadre afin de mieux comprendre les choses dans leur ensemble. Dans un système qui privilégie l'orientation du chercheur dans la direction de la première dimension, les avancées en direction de la seconde dimension s'effectuent de manière opportuniste. Il s'agit d'une réceptivité qui ne s'exprime qu'en fonction des « activateurs » rencontrés, fournissant l'affordance pour une déviation. Si leur nombre est faible le parcours résultant est dominé par la première dimension, donnant à voir un « fil rouge » ou « conducteur » évident et débouchant sur un projet s'inscrivant dans la droite ligne tracée par ce fil.

Si leur nombre est important, ce fil rouge est le plus souvent bien moins évident à voir. Bien que l'on puisse toutefois tenter de le dévoiler, ce n'est pas à l'aune de ce fil que l'on apprécie dans ce cas, me semble-t-il, le parcours. Ce serait à mon sens plutôt la cohérence entre les éléments du parcours et du chercheur que l'on prétend ou ambitionne d'être qui serait à apprécier. Et pour quelqu'un qui souhaite s'intéresser aux objets complexes au travers de démarches nécessairement inter- voir transdisciplinaires, il vaut mieux que ce parcours ait été jalonné d'un bon nombre d'activateurs. Ou peut-être n'est-ce qu'en fonction de ces rencontres que l'on développe progressivement une ambition interdisciplinaire... toujours est-il que ce type de rencontres, j'en ai eu !

Venons-en donc au factuel :

Mu par le peu de considération de mes concitoyens pour ce compartiment, ressource et médium si fondamentale pour la vie qu'est le sol, considéré en moyenne comme 'sale' et tout juste bon à y poser le pied même si on l'éviterait bien, je me suis intéressé à la science du sol. Si cela trahit bien un intérêt pour la relation de l'homme à son environnement, je souhaitais m'intéresser à cet objet dans l'absolu, et non pas dans une perspective utilitaire restreinte. Cela m'a emmené à la géographie physique plutôt qu'à l'agronomie. L'objet complexe prédispose son observateur à la pluridisciplinarité, comme l'indique si bien de modèle factoriel de Jenny (1941), mais j'étais loin de me douter des pérégrinations dans lesquelles ce choix allait m'entraîner.

Il sera dans cet ouvrage souvent question de la relation homme – environnement, cette opposition dont je suis venu à explorer les limites et la pertinence dans mon contexte. Un dualisme propre surtout

à l'homme occidental et qui s'est donc retrouvé reflété dans le développement de la science occidentale moderne avec ses « deux cultures » (Snow, 2012), cette séparation sciences exactes et sciences humaines opérée au cours du XIX^e siècle. Ce clivage est si fort que même une discipline comme la géographie pour laquelle elle est totalement contre-nature n'y a pas résisté. Etudiant à Amsterdam je me suis ainsi retrouvé dans un bâtiment de géographie physique, à côté d'un autre hébergeant nos collègues en géographie sociale, les deux étant reliés à chaque étage par des passerelles vitrées comme pour mieux souligner la séparation (Figure I.1). Notre objet à nous était le milieu « naturel » que nous étudions sans trop nous poser la question de sa définition. Mais si l'homme était souvent bien présent dans les paysages étudiés, le principe de disciplines telles que la géomorphologie ou la géographie des sols était de faire abstraction de ce « perturbateur ».

L'unique illustre prédécesseur que nous connaissions dans notre petit milieu de la géographie physique néerlandais, W.F. Hermans, un des trois grands écrivains néerlandais de l'après-guerre, avait dit-on abandonné le domaine suite au constat de l'impossibilité de faire abstraction de l'homme. C'est au fond de l'Amazonie en 1993 où j'ai fait mes armes de chercheur que je rencontrais ce dilemme : à la suite des études et pour le compte d'une fondation de recherche néerlando-colombienne j'y étudiais le système racinaire et ses dynamiques dans deux biotopes forestiers dans le cadre d'un programme s'intéressant aux cycles des nutriments et de l'eau (R-14)¹. Mais est-ce que tout l'enjeu n'était-il pas de finir par considérer l'homme ? C'était, dans une perspective Darwinienne, sans doute utile de se former par l'étude de milieux « naturels » plus 'simples' où la question de l'influence de l'homme ne se pose pas ou peu, comme Déléage (1994) explique la tendance « naturaliste » de l'écologie. Je pouvais ensuite continuer cette exploration, où m'estimer « prêt » pour me tourner vers la recherche plus appliquée, forcément appliquée aux systèmes anthropisés.

S'il n'y a pas eu d'hésitation dans le choix pour cette dernière option, il y avait une habitude et une volonté de discrétion, de rester à l'écart de l'action. Mon but devenait de produire des connaissances contribuant à une représentation qui un jour se révélerait d'utilité pour l'action. Suite à la rencontre d'un premier activateur je suis passé à la science du sol version française : mes débuts en agronomie. A la suite d'un DEA National en 1996 (Po-5), malheureusement disparu depuis, et d'un contrat de chargé d'étude (dans le cadre du projet européen IMPEL ; R-12) nous avons monté au Laboratoire de Science du Sol de l'INRA ENSA de Montpellier (plus tard « Sol & Environnement », et plus tard encore UMR Lisah) un projet de recherche portant sur la télédétection de paysages agricoles, financé par l'Union Européenne (doctorat, bourse Marie Curie). Anticipant l'évolution technologique des capteurs satellitaires j'ai réalisé des prises de vue héliportées du paysage viticole de la vallée de l'Hérault afin de développer des méthodes de détection automatique de caractéristiques de la surface du sol. L'état de cette surface étant un déterminant de l'écoulement de l'eau (et donc du transport de

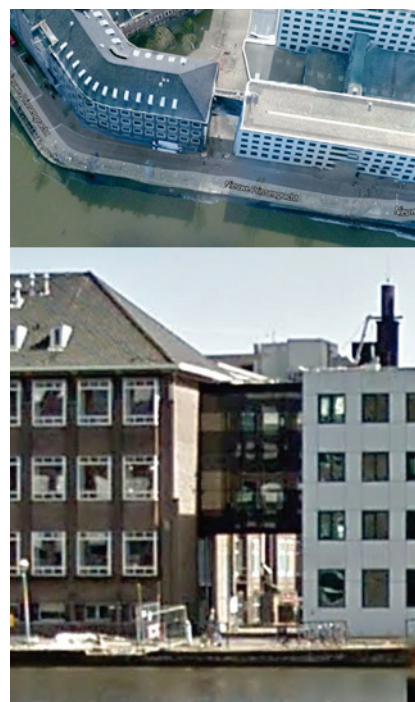


Figure I.1 Bâtiments voisins contrastés (avec passerelle vitrée) hébergeant dans les années 1990 la faculté de Géographie Physique (à gauche) et la faculté de Géographie Sociale (à droite) de l'Université d'Amsterdam.

¹ Tout au long de ce rapport, les codes en parenthèses font référence à la liste de mes publications, section I.C.

solutés et du risque d'érosion associés), de telles informations devaient renseigner la modélisation hydrologique distribuée. Par une approche stratifiée et en exploitant l'ensemble des dimensions d'information du signal capté (radiométrique, spatiale et directionnelle) nous avons réussi à produire des informations d'intérêt de manière automatisée.

De ces recherches en télédétection dites « de classification » je suis passé en 2001 à la télédétection quantitative, qui a pour objectif l'estimation de grandeurs physiques d'intérêt, de flux, sur la base d'informations radiométriques. Au sein du laboratoire de bioclimatologie de l'INRA d'Avignon j'ai contribué au projet européen WaterMed par la détermination d'une relation simplifiée permettant d'estimer l'évapotranspiration en milieu agricole hétérogène (par rapport à la résolution d'observation). Bien que depuis les années 70 la télédétection ait été développée par et pour les sciences de la nature, et notamment les sciences de la terre, ces deux expériences m'amenaient au constat qu'il est désormais difficile pour des thématiciens de réaliser seuls de sérieux progrès dans ce domaine. Si la classification – la reconnaissance d'objets – est désormais pour bonne partie l'affaire des mathématiques (le traitement de signal), la télédétection quantitative relève pour bonne partie de la physique.

Un autre cas d'affordance s'est alors présenté avec la rencontre d'un second activateur me permettant d'opérer une inflexion qui était latente. Elle me faisait passer de producteur à utilisateur d'informations spatiales. Cela afin de m'intéresser désormais directement à la relation homme – environnement au travers de sa forme la plus évidente, ancienne, intense et directe ; l'agriculture : Au sein de la division Production Animale du département Agriculture de la FAO j'intégrais fin 2002 une petite équipe de 4 personnes coordonnant l'initiative élevage, environnement et développement (LEAD). Ce nouveau positionnement était intéressant à deux titres : ces collègues étant occupés par la gestion de cette initiative, j'y bénéficiais d'une grande liberté, mais donc aussi d'une responsabilité certaine, pour approfondir des relations élevage – environnement identifiées comme stratégiques. Seul à pouvoir m'adonner entièrement à une activité de recherche, j'y étais aussi le seul « environnementaliste » entouré pas seulement d'agronomes, mais surtout de vétérinaires et d'économistes. Une première mission visait à apprécier la contribution de l'élevage bovin à la déforestation dans les Néotropiques, région allant du Guatemala au Paraguay. Elle m'a emmené à établir une collaboration avec le groupe de recherche en modélisation de changements d'occupations et d'utilisation du sol (équipe de P. Verburg) à l'université de Wageningen, Pays-Bas. Avec l'appui des représentants nationaux de la FAO j'ai dans ce cadre également organisé et animé deux ateliers d'experts nationaux des pays de la région, en 2003 et 2004, accueillis par le centre de recherche agronomique centre-américain au Costa Rica (CATIE).

A la conclusion de cette étude une nouvelle ambition s'était emparée de notre groupe ; celle de dresser un bilan global de « l'impact » du secteur de l'élevage sur l'environnement, dans le but de mieux cibler la recherche et l'action. Profitant de notre positionnement unique en termes d'accès aux réseaux et aux bases de données, nous nous sommes lancés dans la rédaction d'un ouvrage structuré pour sa partie environnementale (donc hors analyses sectorielles et politiques) autour de ce qui aujourd'hui semble s'appeler les « limites planétaires » : l'eau, la biodiversité et le changement climatique. Dans cet effort réalisé sur deux ans (fin 2004 à fin 2006) j'ai été chargé de la rédaction des deux derniers thèmes, et de la réalisation des études requises à cet effet, ainsi que de la partie « eau virtuelle » de la section sur l'eau. Cela m'a permis d'établir de nouvelles collaborations de recherche, comme avec le réseau RAMIRAN (le réseau de recherche en recyclage de résidus agricoles et industriels en agriculture)

et avec le projet Conséquences de la Production Animale Industrialisé (CIAP) du réseau interdisciplinaire SCOPE (Comité Scientifique sur les Problèmes Environnementaux). Au titre de ma compétence de géographe j'ai contribué aux analyses sectorielles qui constituent la base des estimations d'impact. Cette contribution a consisté à superviser l'actualisation sous-traitée de l'inventaire global des systèmes de production ; à réaliser une cartographie mondiale plus détaillée de ces systèmes ; et à produire des analyses spatio-temporelles démontrant la tendance globale de « péri-urbanisation » de l'élevage intensif. A ce même titre j'ai été chargé de la réalisation de la contribution de LEAD au projet CPWF (*Challenge Program on water and Food*) concernant le bassin du Nile et porté par l'ILRI (*Increasing water-use efficiency for food production through better livestock management - the Nile River Basin – 2003-2007*). Cette contribution consistait en (1) la définition d'une typologie de systèmes orientée vers l'usage de l'eau ; (2) la cartographie de ces systèmes ; (3) l'identification de hotspots d'intérêt par le croisement de cette cartographie avec celle de la densité des troupeaux.

Au-delà de l'ouvrage « l'ombre portée de l'élevage » (O-12) issu de ce travail, ces activités et collaborations nous ont amené à organiser une « consultation globale » à la fin 2006, à Bangkok, Thaïlande. Cette conférence réunissait des représentants de la recherche, de gouvernements et de l'industrie afin d'initier un processus toujours plus vaste d'inventaire des conséquences environnementales, économiques, sociales et sanitaires des changements dans le secteur de l'élevage. J'ai considéré à ce moment-là que ma contribution scientifique à ces processus était terminée et j'ai souhaité quitter ce travail à l'échelle globale ; une échelle adaptée aux diagnostics, mais qui me semblait tout compte fait peu adaptée à l'action.

Fin 2006 j'étais recruté au sein de l'unité de « suivi des ressources agricoles » (MARS) du Centre Commun de Recherche (CCR ou JRC) de la Commission européenne, placée à l'époque sous la tutelle de son Institut pour la Protection et la Sécurité du Citoyen (IPSC, dont j'ai été nommé au Conseil Scientifique), où je portais ma désormais double casquette. En premier lieu j'y étais chargé de développer de nouvelles méthodes de (télé)détection automatique d'objets d'intérêt pour la politique agricole commune, permettant aussi de mieux valoriser l'énorme quantité d'imagerie satellitaire à très haute résolution acquise annuellement par la Commission dans ce cadre. En parallèle, et suite à des discussions au sein du Parlement européen induites par l'ouvrage de la FAO, j'ai été mandaté au début 2008 par le Directorate Générale de l'Agriculture de la Commission européenne pour coordonner une étude visant à estimer la contribution du secteur de l'élevage aux émissions de gazes à effet de serre (GES) de l'Union Européenne (intitulé GGELS).

Dans le cadre de la première mission j'ai mis en œuvre une stratégie d'alliance basée sur mon constat de 2002 d'un besoin de collaboration entre thématiciens experts de l'objet d'observation et, pour ce qui est de l'image à très haute résolution, des experts du traitement du signal. Outre de fructueuses collaborations en interne au JRC (avec l'Institut pour l'Environnement et la Durabilité, IES), deux conventions ont ainsi permis de réaliser des recherches en collaboration avec l'université de Bilkent (Ankara, Turquie) et avec le projet Ariana du Laboratoire d'Informatique, Signaux et Systèmes de Sophia Antipolis.

Le projet GGELS a fait l'objet d'un Arrangement Administratif entre le DG AGRI et le DG JRC. Il s'agissait d'un projet réalisé conjointement par quatre unités appartenant à trois instituts distincts du JRC (IPSC, IES et IPTS : l'Institut des Etudes Technologiques Prospectives à Séville). Nous avons réalisé au sein de MARS 3 des 9 « work packages » de l'étude, incluant un travail d'enquête au sein de l'UE27 sous-traité

à RAMIRAN (au travers de l'UR Gestion environnementale et traitement biologique des déchets de l'Irstea de Rennes) pour déterminer les pratiques de gestion d'effluents à l'échelle NUTS 2 (Nomenclature des unités territoriales statistiques, le niveau 2 correspondant en France aux Régions). J'ai pu superviser la première des deux phases du projet, le démarrage de la seconde phase coïncidant avec mon départ au printemps 2009.

Ce départ est le fruit de la rencontre d'un dernier activateur, une offre d'emploi constituant à la fois une suite (et fin) logique de mes pérégrinations et la réalisation de ce qui dans mon subconscient semble toujours avoir été mon objectif. Depuis mi-2009 je m'investis ainsi durablement dans une thématique que mes travaux aux niveaux régional et global avaient permis d'identifier comme une des principales voies de réduction de notre « empreinte » environnementale, grâce aux multiples synergies qu'elle implique : la gestion des résidus organiques, forcément contextualisé donc non-global, visant une réelle valorisation en agriculture. C'était faire mienne la problématique abordée au début des années 2000 par mes collègues de LEAD à la FAO dans le cadre d'initiatives de « Area-Wide Integration of Crop-Livestock Activities ». Avec une différence majeure : en considérant non plus seulement les résidus d'une activité d'élevage, mais ceux de toute activité humaine, de production ou de consommation. Un tel objectif de gestion intégrée amène inéluctablement à privilégier l'échelle du territoire. Et ce « retour au territoire » s'accompagne d'un « retour au sol », donc un retour à la science du sol. Qui plus est, il s'agit là du trait d'union entre la pédogénèse « naturelle » et celle des sols « exploités », de l'ambition de ressouder cette « rupture métabolique » qui s'est opérée dans ces milieux exploités, déjà dénoncé par Karl Marx (Foster, 2000, 1999) et qui ne cesse de s'aggraver depuis.

Une grosse ambition pour une petite unité, l'UR Recyclage & risque du CIRAD... Je m'y intéresse plus à la gestion des résidus et son bilan environnemental qu'au processus pédologiques, mais au sein d'un collectif où tous s'intéressent nécessairement à ces deux dimensions, avec des équilibres distincts donc complémentaires. Notre considération de la gestion se veut forcément prospective, ce qui aboutit à des travaux nécessairement participatifs : me voilà donc entré de plain-pied dans la considération de l'homme et de son action, ce facteur du modèle factoriel de Jenny si longtemps mis de côté. Affecté à la Réunion de mi-2009 à mi-2015, j'y ai réalisé des travaux conceptuels en parallèle de la coordination d'un projet opérationnel multi partenarial servant de « pilote » et pour lequel les expériences en modélisation et en analyse spatiale se révèlent bien utiles (« GIROVAR », projet CasDAR, 2011-2014, incluant l'encadrement direct d'une thèse et de plusieurs stages). Ces activités qui se réclament de l'écologie territoriale amènent à s'interroger au sujet de la relation homme – environnement voir même au sujet de la pertinence de cette distinction. Mon ambition – et c'est une de mes activités depuis mon « retour » à Montpellier au second semestre 2015 – est que les pistes que cette réflexion commence à produire alimentent la maturation de ce domaine encore jeune de l'écologie territoriale. Et qu'à son tour cela permette d'affiner la démarche à suivre pour des projets de recherche-développement à mettre en œuvre sur des territoires aux forts enjeux et potentiels.

En conclusion j'observe qu'au-delà de l'aléa, ce parcours se présente comme une fonction composée d'une part de paramètres toujours présents, et constants à chaque étape (e.g. l'objet sol, le plus souvent comme ressource à gérer ; l'échelle, le plus souvent celle du territoire ; les relations spatiales) et de variables, changeant progressivement au cours du parcours (e.g. l'évolution en direction d'une transdisciplinarité ; la considération croissante et changeante de la dimension temporelle, d'absent à historique à prospectif et puis aux horizons qui restent à être proprement définis), expliquant

ensemble ce parcours. Une fonction qui tend vers une stabilisation, bien que restant sujet à de possibles perturbations.

B. Curriculum Vitae

	Tom Wassenaar né le 20 avril 1971, nationalités française et néerlandaise
Profil	
Profession	Conception de systèmes de recyclage de résidus organiques et leur évaluation environnementale
Fonction	Chercheur sénior
Organisme	CIRAD, département Performances des systèmes de production et de transformation tropicaux, unité Recyclage et risque
Compétences	écologie territoriale, sciences de l'environnement, géographie physique, pédologie, télédétection
Thématiques actuelles	Recherche interdisciplinaire pour la conception de systèmes de recyclage durables contribuant au développement de territoires : co-construction de scénarios de symbiose industrielle, modélisation conceptuelle et informatique de scénarios de gestion, évaluation environnementale
Autres expertises	estimation et cartographie par télédétection de variables environnementales en milieu agricole ; modélisation des relations élevage – environnement ; analyse spatiale et cartographie
Régions d'expérience	Europe (<i>sur place</i> : France méditerranéenne, La Réunion, Pays-Bas, Italie, Espagne), bassin du Nile (<i>sur place</i> : Ethiopie, Uganda), les Néotropiques (<i>sur place</i> : Colombie, Costa Rica)
Formation	
1989 - 1995	Master of Science en Géographie Physique - Faculté des Sciences Spatiales, Université d'Amsterdam. Spécialisation : Géographie du sol. Mention : très bien
1996 - 1997	Diplôme d'Etudes Approfondies Nationale de Science du Sol – stage à ENSA Montpellier (SupAgro). Mention : très bien
1998 - 2001	Doctorat de Science du Sol - INRA Montpellier, laboratoire Sol et Environnement. Thèse soutenue le 14 mars 2001 à l'ENSA.M avec félicitations du jury
Activité Professionnelle	
depuis mai 2009	Chercheur dans l'unité propre de recherche « Recyclage & risque » du CIRAD mai 2009 – août 2009, puis depuis août 2015 : CIRAD Montpellier août 2009 – août 2015 : CIRAD Saint Denis, La Réunion
octobre 2006 – avril 2009	Chercheur au DG Centre Commun de Recherche (JRC) de la CE, Ispra (Italie), dans l'unité MARS (suivi de l'agriculture et de la durabilité rurale) de l'Institut pour la Protection et la Sécurité du Citoyen (IPSC)
décembre 2002 – septembre 2006	Chargé de mission en élevage et environnement, à la FAO, Rome (Italie), au sein de l'initiative LEAD (Livestock, Environment And Développement initiative) de l'unité AGAL (information, analyse et politique du secteur de l'élevage)

octobre 2001 – novembre 2002	Post-doctorant en agro-climatologie à l'INRA, Avignon, au sein de l'unité Climat, Sol et Environnement
	étude comparative de modèles d'estimation de l'évapotranspiration basés sur la télédétection, dans le cadre du projet européen WaterMed
novembre 1997 – février 1998	Chargé d'étude en modélisation à l'INRA, Montpellier, au sein de l'unité Sol et Environnement de l'INRA Montpellier
	étude de l'impact du changement climatique et de la variabilité spatiale du sol sur la croissance de cultures à l'échelle d'un bassin versant, dans le cadre du projet européen IMPEL
novembre 1995 – août 1996	Assistant-manager de projet dans une entreprise multinationale (Wärtsilä Diesel Powerplants), Pays Bas
	Administration de projets de construction de centrales électriques dans divers pays en développement
mai 1995 – octobre 1995	Chargé d'étude à Flor y Fauna S.A., Costa Rica
	Co-encadrement de la cartographie hydro-pédologique d'une exploitation de teck de 3 500 ha, dans le cadre de son écocertification par le Forest Stewardship Council
février 1994 – avril 1995	Chargé d'étude à la fondation Tropenbos Colombia, Colombie
	étude du rôle des racines dans le cycle des nutriments de divers écotopes de l'Amazonie colombienne
Vie scientifique	
principales collaborations	Au CIRAD : intra-CIRAD (UR GREEN*) ; collectivités locales à la Réunion ; RMT Fertilisation & Environnement, INRA (Ecosys*)
	Au JRC : intra-JRC (4 UR* des instituts IES et IPTS) ; Université de Bilkent*, Turquie ; INRIA Sophia Antipolis
* productives	A la FAO : ILRI, Ethiopie ; CATIE*, Costa Rica ; Scientific Committee on Problems of the Environment (SCOPE)/Université de Stanford*
participation à des projets de recherche financés	Direction de projets de recherche sous contrat : <ul style="list-style-type: none"> – <i>Gestion Intégrée des Résidus Organiques par leur valorisation Agricole à la Réunion</i> (GIROVAR), contrat CIRAD – Ministère de l'Alimentation de l'Agriculture et de la Pêche, 2011-2014, subvention CasDAR de 272 411 € ; – <i>Evaluation of the livestock sector's contribution to the EU greenhouse gas emissions</i> (GGELS), arrangement administratif DG JRC - DG AGRI, 2008-2010, JRC n° de contrat 30944-2008-04 NFP ISP, AA n° AGRI-2008-0245, montant de l'ordre de 800 k€. Responsable de tâches : <ul style="list-style-type: none"> – <i>Diagnosis of Waste Treatments for Contaminant Fates in the Environment</i> (DIGESTATE), contrat CIRAD – ANR, 2016 – 2019, subvention de 789 k€, responsable du WP4 Environmental assessment of waste treatment and recycling ; – <i>Optimisation de l'insertion des Produits Résiduaire Organiques dans les systèmes de culture comme levier des services écosystémiques rendus par les sols à l'échelle TERRitoriale</i> (PROTERR), contrat INRA – ADEME, 2017-

encadrement et enseignement

2019, subvention de 420 k€, responsable du lot 2 Diagnostic initial des territoires.

Chercheur associé :

- *WATER use Efficiency in natural vegetation and agricultural areas by Remote sensing in the MEDiterranean basin* (WATERMED, Project ID: ICA3-CT-1999-00015), contrat Universitat de Valencia – UE (FP5-INCO 2), 2000 – 2004, contribution UE 764 800 € ;
- *Spatial Modelling of the response and adaptation of soils and land use systems to climate change - an integrated model to predict European land use* (IMPEL, project ID: ENV4950114), contrat Cranfield University – UE (FP4-ENV 2C), 1996 – 1999.

compagnonnage : J.-D. Cesaro (2017-2018), jeune chercheur en écologie territoriale à l'UMR Selmet

encadrement de thèse : F. Dumoulin (2012-2016), Université de la Réunion, bourse CIRAD-ADEME, soutenue le 7/12/2016 : *Evaluation environnementale d'un projet de symbiose industrielle territoriale. Application à un projet de gestion territorialisée de résidus organiques valorisés en agriculture dans l'ouest de la Réunion* – 6 co-publications : 3 articles de revue et 3 conférences

comité de thèse et jury : A. Thévenot (2011-2013), Université de la Réunion, soutenue le 23/04/2014 : *Un nouveau cadre conceptuel pour évaluer la contribution des filières agricoles au développement durable des territoires – application à la filière avicole réunionnaise*

encadrement de stages M2 : C. Laborde (2010), A. Glachant (2011), J. Boyer (2012), C. Jouan (2012), G. Ramin (2014)

encadrement de stages M1 : M. Gauvin (2013) + participation dans divers jurys de soutenance

supervision de CDD, VSC et sous-traitance : L. Albin (VSC, 2013) ; L. Seguin (CDD, 2007-2008) ; J. Groenewold (CDD, 2004) ; UR GERE, Irstea (2008) ; RAMIRAN (2005)

enseignement : formation professionnelle pour agents publiques (DAAF et EPLEFPA Réunion) : *La valorisation agronomique des résidus organiques à la Réunion*, mai 2015

production

articles de périodiques à comité de lecture : 23

dont 3 co-signés avec F. Dumoulin, doctorant encadré

actes à comité de lecture : 9

ouvrages : 2

chapitres d'ouvrage : 8

dont 2 co-signés avec F. Dumoulin, doctorant encadré

communications de conférence : 11

dont 3 co-signés avec F. Dumoulin, doctorant encadré

posters : 5

rapports : 18, dont 4 rapports diplômant

formations
courtes

logiciels enregistrés : 1

Analyse de Cycle de Vie : JRC et Université de Stuttgart, juin 2008 ; Supagro Montpellier, juin 2009

École Analyse Multi-résolution pour l'image. LIRIS, Université Lyon 1, mars 2007

FAO Project Cycle Overview Course. Rome, juin 2005

Connaissance et Gestion des Entreprises - Gestion de Projet (40 h cours et débats), Institut d'Administration des Entreprises, Université Montpellier II, 1999-2000

Advanced Course on Mathematical Aspects of Image Processing. Cours d'été de 2 semaines à l'Université de Barcelone, 1999

Auto-formation en développement informatique (Matlab, IDL, Turbo Pascal, Fortran, HTML, AnyLogic)

divers

relecture d'articles pour Resources Conservation & Recycling, Agricultural Systems, Chemosphere, Journal of Hazardous Materials, Journal of Environmental Management

participation dans divers « chantiers transversaux » (Impact of Research in the South – ImpresS ; Filières & Développement durable), task forces et autres groupes de travail du CIRAD

présentations invitées hors cadre scientifique :

- Salon Internationale de l'Agriculture, 2017
- séminaire RMT Spyce, 2015
- conférence/table ronde « Feeding the world under the climate threat » au Parlement Européen, 2008
- Université de Wageningen dans le cadre d'un cours international sur le développement du secteur laitier, 2008
- DG DEVCO, Commission Européenne, 2007 (l'ouvrage Ombre Portée de l'Elevage, FAO)

modérateur de session : conférence internationale RAMIRAN 2013

membre nommé du conseil scientifique de l'IPSC, JRC (2008-2009)

C. Liste des publications

Tout au long de ce rapport, les codes Lettre-Nombre entre parenthèses se réfèrent à ceux de la présente liste des publications.

1. Articles dans revues à comité de lecture

(FI : facteur d'impact selon l'InCites Journal Citation Report 2016 de Thomson Reuters)

- A-1. Dumoulin, F., Wassenaar, T., Avadi, A., Paillat, J., 2016. A framework for accurately informing facilitated regional industrial symbioses on environmental consequences. *Journal of Industrial Ecology* 0, 19. doi:10.1111/jiec.12495 – FI: 4,12
- A-2. Wassenaar, T., Queste, J., Paillat, J.-M., 2016. Le recyclage agricole des résidus organiques : une ressource naturelle pour en préserver d'autres. *Agronomie, Environnement & Société* 6, e12.
- A-3. Jarousseau, H., Wassenaar, T., Sallote, B., Paillat, J.-M., 2016. Recyclage des déchets et dynamiques sociales dans la transition du rural au périurbain à la Réunion. *Cahiers Agricultures* 25, 65002. doi:10.1051/cagri/2016043 – FI: 0,32
- A-4. Wassenaar, T., 2015. Reconsidering industrial metabolism: From analogy to denoting actuality. *Journal of Industrial Ecology* 19, 715–727. doi:10.1111/jiec.12349 – FI: 4,12
- A-5. Wassenaar, T., Bravin, M.N., Dumoulin, F., Doelsch, E., 2015. Ex-ante fate assessment of trace organic contaminants for decision making: A post-normal estimation for sludge recycling in Reunion. *Journal of Environmental Management* 147, 140–151. doi:10.1016/j.jenvman.2014.09.015 – FI: 4,01
- A-6. Wassenaar, T., Queste, J., Paillat, J.-M., Saint Macary, H., 2015. La co-construction de filières de recyclage de résidus organiques à la Réunion. *Innovations Agronomiques* 43, 161–175.
- A-7. Dumoulin, F., Wassenaar, T., 2014. Environment in Industrial Ecology, Grasping a Complex Notion for Enhancing Industrial Synergies at Territorial Scales. *Sustainability* 6, 6267–6277. doi:10.3390/su6096267 – FI: 1,79
- A-8. Wassenaar, T., Doelsch, E., Feder, F., Guerrin, F., Paillat, J., Thuriès, L., Saint Macary, H., 2014. Returning Organic Residues to Agricultural Land (RORAL) – Fuelling the Follow-the-Technology approach. *Agricultural Systems* 124, 60–69. doi:10.1016/j.agsy.2013.10.007 – FI: 2,57
- A-9. Aksoy, S., Akcay, H.G., Wassenaar, T., 2010. Automatic Mapping of Linear Woody Vegetation Features in Agricultural Landscapes Using Very High Resolution Imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 48, 511–522. doi:10.1109/TGRS.2009.2027702 – FI: 4,94
- A-10. Baraldi, A., Wassenaar, T., Kay, S., 2010. Operational Performance of an Automatic Preliminary Spectral Rule-Based Decision-Tree Classifier of Spaceborne Very High Resolution Optical Images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 48, 3482–3502. doi:10.1109/TGRS.2010.2046741 – FI: 4,94
- A-11. Wassenaar, T., Kay, S., 2008. Biofuels: One of Many Claims to Resources. *Science* 321, 201–201. doi:10.1126/science.321.5886.201 – FI: 37,21
- A-12. Galloway, J.N., Burke, M., Bradford, G.E., Naylor, R., Falcon, W., Chapagain, A.K., Gaskell, J.C., McCullough, E., Mooney, H.A., Oleson, K.L.L., Steinfeld, H., Wassenaar, T., Smil, V., 2007.

- International Trade in Meat: The Tip of the Pork Chop. *AMBIO: A Journal of the Human Environment* 36, 622–629. doi:10.1579/0044-7447(2007)36[622:ITIMTT]2.0.CO;2 – FI: 3,69
- A-13. Wassenaar, T., Gerber, P., Verburg, P.H., Rosales, M., Ibrahim, M., Steinfeld, H., 2007. Projecting land use changes in the Neotropics: The geography of pasture expansion into forest. *Global Environmental Change* 17, 86–104. doi:10.1016/j.gloenvcha.2006.03.007 – FI: 6,33
- A-14. Steinfeld, H., Wassenaar, T., 2007. The Role of Livestock Production in Carbon and Nitrogen Cycles. *Annual Review of Environment and Resources* 32, 271–294. doi:10.1146/annurev.energy.32.041806.143508 – FI: 6,27
- A-15. Steinfeld, H., Wassenaar, T., Jutzi, S., 2006. Livestock production systems in developing countries: status, drivers, trends. *Revue scientifique et technique (International Office of Epizootics)* 25, 505–16. – FI: 0,93
- A-16. Steinfeld, H., Gerber, P., Wassenaar, T., Castel, V., Rosales, M., de Haan, C., 2006. Livestock's long shadow: Environmental issues and options. *Renewable Resources Journal* 24, 15–17.
- A-17. Wassenaar, T., Andrieux, P., Baret, F., Robbez-Masson, J.M., 2005. Soil surface infiltration capacity classification based on the bi-directional reflectance distribution function sampled by aerial photographs. The case of vineyards in a Mediterranean area. *Catena* 62, 94–110. doi:10.1016/j.catena.2005.05.004 – FI: 3,19
- A-18. Wassenaar, T., Robbez-Masson, J.-M., Andrieux, P., Baret, F., 2002. Vineyard identification and description of spatial crop structure by per-field frequency analysis. *International Journal of Remote Sensing* 23, 3311–3325. doi:10.1080/01431160110076144 – FI: 1,72
- A-19. Robbez-Masson, J.M., Wassenaar, T., Andrieux, P., Baret, F., 2001. Reconnaissance par télédétection rapprochée des vignes et analyse de leur structure spatiale à l'aide d'une analyse fréquentielle intra-parcellaire. Application au suivi des effets des pratiques culturales. *Ingénieries* 27, 59–67.
- A-20. Wassenaar, T., Baret, F., Robbez-Masson, J.-M., Andrieux, P., 2001. Sunlit soil surface extraction from remotely sensed imagery of perennial, discontinuous crop areas; the case of Mediterranean vineyards. *Agronomie* 21, 235–245. doi:10.1051/agro:2001120 – FI: 0,86
- A-21. Lagacherie, P., Cazemier, D.R., Martin-Clouaire, R., Wassenaar, T., 2000. A spatial approach using imprecise soil data for modelling crop yields over vast areas. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 81, 5–16. doi:10.1016/S0167-8809(00)00164-X – FI: 4,10
- A-22. Wassenaar, T., Lagacherie, P., Legros, J., Rounsevell, M., 1999. Modelling wheat yield responses to soil and climate variability at the regional scale. *Climate Research* 11, 209–220. doi:10.3354/cr011209 – FI: 1,36

Articles soumis :

- AS-1. Queste, J., Wassenaar, T., n.d. A practical dialogue protocol for sustainability science to contribute to regional environmental management. *Journal of Environmental Management*, soumis.
- AS-2. Queste, J., Wassenaar, T., n.d. Apprentissages et mythe rationnel: Évaluation des effets de la concertation sur l'écologie territoriale. *Cahiers Agricultures*, sous presse.

2. Proceedings à comité de lecture

- Pr-1. Lahbib-Burchard, T., Wassenaar, T., Doelsch, E., Feder, F., Bravin, M., 2012. Prédiction de l'accumulation à long-terme des éléments traces métalliques dans les sols en contexte de recyclage agricole de produits résiduels organiques en milieu tropical : Validation d'un modèle par mesures in situ. *Milieux Poreux et Transferts Hydriques*, Bulletin du GFHN 58, 185–192.
- Pr-2. Gerber, P., Wassenaar, T., Rosales, M., Castel, V., Steinfeld, H., 2007. Environmental impacts of a changing livestock production: overview and discussion for a comparative assessment with other food production sectors, in: Bartley, D.M., Brugère, C., Soto, D., Gerber, P., Harvey, B. (Eds.), *Comparative Assessment of the Environmental Costs of Aquaculture and Other Food Production Sectors. Methods for Meaningful Comparisons*. FAO/WFT Expert Workshop, 24-28 April 2006. Vancouver, Canada. FAO Fisheries Proceedings 10. FAO, Rome, pp. 37–54.
- Pr-3. Aksoy, S., Akcay, G., Cinbis, G., Wassenaar, T., 2008. Automatic Mapping of Linearwoody Vegetation Features in Agricultural Landscapes, in: IGARSS 2008 - 2008 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE, Boston, USA, p. IV-403-IV-406. doi:10.1109/IGARSS.2008.4779743
- Pr-4. Olioso, A., Rivalland, V., Faivre, R., Weiss, M., Demarty, J., Wassenaar, T., Baret, F., Cardot, H., Rossello, P., Jacob, F., Hasager, C.B., Inoue, Y., 2006. Monitoring evapotranspiration over the alpillles test site by introducing remote sensing data at various spatial resolutions into a dynamic SVAT model, in: AIP Conference Proceedings. AIP, Naples, Italy, pp. 234–241. doi:10.1063/1.2349349
- Pr-5. Wassenaar, T., Olioso, A., Hasager, C., Jacob, F., Chehbouni, A., 2002. Estimation of evapotranspiration on heterogeneous pixels, in: Sobrino, J.A. (Ed.), *First International Symposium on Recent Advances in Quantitative Remote Sensing*. Publicacions de la Universitat de València, Valencia, Spain, pp. 458–465.
- Pr-6. Olioso, A., Hasager, C., Jacob, F., Wassenaar, T., Chehbouni, A., Marloie, O., Lecharpentier, P., Courault, D., 2002. Mapping surface sensible heat flux from thermal infrared and reflectances data using various models over the Alpillles test site, in: Sobrino, J.A. (Ed.), *First International Symposium on Recent Advances in Quantitative Remote Sensing*. Publicacions de la Universitat de València, Valencia, Spain, pp. 450–457.
- Pr-7. Wassenaar, T., Robbez-Masson, J.M., Baret, F., Andrieux, P., 2002. Mapping vineyard soil surface features by very high spatial resolution remote sensing, in: Sobrino, J.A. (Ed.), *First International Symposium on Recent Advances in Quantitative Remote Sensing*. Publicacions de la Universitat de València, Valencia, Spain, pp. 167–176.
- Pr-8. Wassenaar, T., Robbez-Masson, J.M., Andrieux, P., Baret, F., 2000. Vineyard spatial structure analysis by per-field aerial photograph processing, in: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. Vol. XXXIII. ISPRS, Amsterdam, pp. 1692–1699.
- Pr-9. Lagacherie, P., Cazemier, D.R., Martin-Clouaire, R., Wassenaar, T., 1999. A spatialisation approach using imprecise soil data for modelling crop yield over vast areas, in: *International Conference of Spatial Statistics for Production Ecology*. Wageningen University, Wageningen, pp. 5–16.

3. Ouvrages et chapitres d'ouvrages

- O-1. Caron, P., Valette, E., Wassenaar, T., Coppens D'Eeckenbrugge, G., Papazian, V., 2017. Des territoires vivants pour transformer le monde. Quae, Paris, France.
- O-2. Vigne, M., Avadí, A., Corson, M.S., Vayssières, J., Wassenaar, T., 2017. Évaluer la capacité des systèmes de production à répondre aux enjeux du développement durable des territoires, in: Caron, P., Valette, E., Wassenaar, T., Coppens D'Eeckenbrugge, G., Papazian, V. (Eds.), Des Territoires Vivants Pour Transformer Le Monde. Quae, Paris, France, pp. 207–217.
- O-3. Queste, J., Robineau, O., Wassenaar, T., 2017. Recyclage urbain et périurbain des matières organiques, une approche fondée sur l'écologie territoriale, in: Caron, P., Valette, E., Wassenaar, T., Coppens D'Eeckenbrugge, G., Papazian, V. (Eds.), Des Territoires Vivants Pour Transformer Le Monde. Quae, Paris, France, pp. 141–146.
- O-4. Wassenaar, T., Dumoulin, F., Farinet, J.-L., Paillat, J.-M., Thuriès, L., Tillard, E., Vayssières, J., Vigne, M., 2016. Agricultural organic waste recycling to reduce greenhouse gas emissions, in: Torquebiau, E. (Ed.), Climate Change and Agriculture Worldwide. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 167–181. doi:10.1007/978-94-017-7462-8
- O-5. Jarousseau, H., David, D., Doelsch, E., Farinet, J.-L., Guerrin, F., Médoc, J.-M., Queste, J., Paillat, J.-M., Saint Macary, H., Sallote, B., Thuriès, L., Wassenaar, T., 2016. La Réunion : recyclage de PRO en milieu insulaire tropical, in: Jarousseau, H., Houot, S., Paillat, J.-M., Saint Macary, H. (Eds.), Le Recyclage Des Résidus Organiques : Regards Sur Une Pratique Agro-Écologique. Quae, Versailles, France, pp. 193–213.
- O-6. Wassenaar, T., Paillat, J.-M., Guerrin, F., Lecomte, P., Médoc, J.-M., Parrot, L., Queste, J., Salgado, P., Tillard, E., Vayssières, J., 2016. Le recyclage des résidus interfilières, in: Biénabe, E., Rival, A., Loeillet, D. (Eds.), Développement Durable et Filières Tropicales. Quae, Versailles, France, pp. 197–212.
- O-7. Wassenaar, T., Dumoulin, F., Farinet, J.-L., Paillat, J.-M., Thuriès, L., Tillard, E., Vayssières, J., Vigne, M., 2015. La réduction des émissions de gaz à effet de serre par la valorisation agricole des résidus organiques, in: Torquebiau, E. (Ed.), Changement Climatique et Agricultures Du Monde. Quae, Paris, France, pp. 157–170.
- O-8. Gerber, P., Robinson, T., Wassenaar, T., Steinfeld, H., 2010. Livestock in geographical transition, in: Steinfeld, H., Mooney, H.A., Schneider, F., Neville, L. (Eds.), Livestock in a Changing Landscape, Volume 1: Drivers, Consequences and Responses. Island Press, Washington DC, pp. 51–66.
- O-9. Steinfeld, H., Gerber, P., Wassenaar, T., Castel, V., Rosales, M., de Haan, C., 2009. L'ombre portée de l'élevage, impacts environnementaux et options pour leur atténuation. FAO, Rome, Italy.
- O-10. Steinfeld, H., Gerber, P., Wassenaar, T., Castel, V., Rosales, M., de Haan, C., 2009. La larga sombra del ganado: problemas ambientales y opciones. FAO, Rome, Italy.
- O-11. Peden, D., Tadesse, G., Misra, A.K., Ahmed, F.A., Astatke, A., Ayalneh, W., Herrero, M., Kiwuwa, G., Kumsa, T., Mati, B., Mpairwe, D., Wassenaar, T., Yimegnuhal, A., 2007. Water and livestock for human development, in: Molden, D. (Ed.), Water for Food, Water for Life: A Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture. Routledge, London, UK, pp. 485–514. doi:10.4324/9781849773799
- O-12. Steinfeld, H., Gerber, P., Wassenaar, T., Castel, V., Rosales, M., de Haan, C., 2006. Livestock's long shadow - Environmental issues and options. FAO, Rome.

4. Communications à des congrès et colloques

- C-1. Wassenaar, T., Queste, J., 2015. Co-designing organic residue recycling chains in off-balance regions, in: 5th International Symposium for Farming Systems Design. European Society for Agronomy, Montpellier, France.
- C-2. Dumoulin, F., Wassenaar, T., Paillat, J.-M., 2014. Assessing Climate Impact of Industrial Symbioses : A Dynamic Approach. EcoBalance. The Institute of Life Cycle Assessment, Tsukuba, Japan, p. 97743.
- C-3. Dumoulin, F., Wassenaar, T., 2014. Bases épistémologiques pour l'évaluation environnementale en EIT et déclinaison pratique pour l'évaluation de leur impact climatique. Colloque Interdisciplinaire Sur L'écologie Industrielle et Territoriale. Université de Technologie de Troyes, Troyes, France, p. 7.
- C-4. Danflos, J.-P., Michels, T., Wassenaar, T., Augusseau, X., Deguine, J.-P., Reynaud, B., Vuillaume, C., 2013. Le Cirad à la réunion : L'agriculture familiale à La Réunion, Gestion agroécologique des mouches des légumes à la Réunion (GAMOUR), Gestion Intégrée des Résidus Organiques par la Valorisation Agronomique à la Réunion (GIROVAR). 2ème Conférence Du Réseau Des Etablissements Agricoles Professionnels de l'Afrique Australe et de l'Océan Indien (REAP). Saint Paul, La Réunion, p. 17.
- C-5. Wassenaar, T., Queste, J., 2013. Returning organic residues to agricultural land (RORAL): scenarios co-construction on Reunion Island. III International Symposium on Agricultural and Agroindustrial Waste Management (III SIGERA). EMBRAPA, Sao Pedro, Brasil.
- C-6. Wassenaar, T., Dumoulin, F., Paillat, J.-M., Queste, J., Thuriès, L., 2013. Scenario Construction for Returning Organic Residues to Agricultural Land (RORAL) on Reunion Island. RAMIRAN 2013, 15th International Conference. INRA, Versailles, France.
- C-7. Wassenaar, T., Queste, J., Paillat, J.M., Saint Macary, H., 2012. La gestion intégrée des produits résiduels organiques de la micro-région Ouest de la Réunion - une démarche d'écologie territoriale mobilisant co-construction et modélisation. Séminaire Du RMT Fertilisation et Environnement : Gestion Territoriale Des Éléments Minéraux Utilisés En Agriculture. RMT Fertilisation et Environnement, Paris, France.
- C-8. Basset-Mens, C., Benoist, A., Bessou, C., Tran, T., Perret, S.R., Vayssières, J., Wassenaar, T., 2010. Is LCA-based eco labelling reasonable? The issue of tropical food products, in: VII International Conference on LCA in the Agri-Food Sector. Università di Bari, Bari, Italy.
- C-9. Wassenaar, T., 2010. Services et impacts environnementaux du recyclage agricole, vers la gestion intégrée des résidus organiques à la Réunion, in: Colloque International Sur L'évaluation Environnementale Pour La Gestion Des Ressources Naturelles. Université de Madagascar, Antananarivo, Madagascar.
- C-10. Saint Macary, H., Médoc, J.M., Paillat, J.M., Bracco, I., Wassenaar, T., 2009. Les bilans régionaux, outils de gestion des déchets. Conférence Internationale Sur La Valorisation Des Déchets et de La Biomasse Résiduelle Dans Les Pays En Développement. Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement, Ouagadougou, Burkina Faso.
- C-11. Wassenaar, T., Andrieux, P., Robbez-Masson, J.M., Baret, F., 2001. Mapping of soil surface features in vineyards by remote sensing at very high spatial resolution. International Symposium on the Significance of Soil Surface Characteristics in Soil Erosion. Université Louis Pasteur, Strasbourg, France.

5. Posters

- Po-1. Dumoulin, F., Wassenaar, T., Heijungs, R., Paillat, J.-M., 2013. Environmental consequences assessment: Towards a comprehensive appraisal. RAMIRAN 2013, 15th International Conference. INRA, Versailles, France.
- Po-2. Oustrière, N., Lahbib-Burchard, T., Doelsch, E., Feder, F., Wassenaar, T., Bravin, M., 2013. Predictive modelling of the long-term accumulation of trace metals in tropical soils amended with organic wastes: field trial validation. RAMIRAN 2013, 15th International Conference. INRA, Versailles, France.
- Po-3. Wassenaar, T., Paillat, J.M., Thuriès, L., Glachant, A., Queste, J., 2011. GIROVAR : Gestion Intégrée des Résidus Organiques par la Valorisation Agronomique a la Reunion. 10èmes Rencontres de La Fertilisation Raisonnée et de L'analyse. COMIFER-GEMAS, Reims, France.
- Po-4. Wassenaar, T., Robbez-Masson, J.M., Andrieux, P., Baret, F., 2000. Vers une télédétection des états de surface en milieu viticole méditerranéen : une méthodologie de reconnaissance de structures spatiales anthropiques. 6es Journées Nationales de l'Etude Des Sols. AFES, Nancy.
- Po-5. Wassenaar, T., Robbez-Masson, J.M., 1998. Application of remote sensing techniques on soil profile photographs: a new era in soil profile description?, 16th World Congress of Soil Science. ISSS, Montpellier, France.

6. Rapports

- R-1. Wassenaar, T., Queste, J., Barret, D., 2016. Recyclage de résidus organiques par co-construction de scénarios - Etude de cas ImpresS. CIRAD, Montpellier, France.
- R-2. Albin, L., Wassenaar, T., 2014. Conception détaillée du modèle UPUTUC. CIRAD, Saint-Denis, La Réunion.
- R-3. Wassenaar, T., Queste, J., 2014. Gestion Intégrée des Résidus Organiques par la Valorisation Agronomique à La Réunion - compte-rendu final du projet GIROVAR (2011-2014), contrat MAAP/DGER/SDI/BIPI 1004. CIRAD, Saint-Denis, La Réunion.
- R-4. Leip, A., Weiss, F., Wassenaar, T., Perez, I., Fellmann, T., Loudjani, P., Tubiello, F., Grandgirard, D., Monni, S., Biala, K., 2010. Evaluation of the livestock sector's contribution to the EU greenhouse gas emissions (GGELS). EC-JRC. Ispra, Italy.
- R-5. Wassenaar, T., Kay, S., Seguini, L., 2009. Comparison of five VHR imagery based operational orchard tree detection algorithms. EC DG JRC. Ispra, Italy.
- R-6. Wassenaar, T., Grandgirard, D., Monni, S., Biala, K., Leip, A., Weiss, F., 2009. Evaluation of the livestock sector's contribution to the EU greenhouse gas emissions – Phase 1 (GGELS). Rapport JRC 51733 EUR 23988 EN. Ispra, Italy.
- R-7. Wassenaar, T., 2009. GGELS, second interim report, Administrative Arrangement N° AGRI-2008-0245: initial overview of the EU livestock sector. EC DG JRC. Ispra, Italy.
- R-8. Wassenaar, T., Grandgirard, D., Biala, K., Leip, A., Monni, S., 2008. GGELS, first interim report, Administrative Arrangement N° AGRI-2008-0245: data and literature survey and methodological proposal. Ispra, Italy.
- R-9. Falcon, W., Mooney, H., Naylor, R., Neville, L., Alder, J., Bradford, E., Burke, M., Galloway, J., Gaskell, J., McCullough, E., Chapagain, A., Oleson, K., Peters, H., Smil, V., Steinfeld, H.,

- Wassenaar, T., 2005. Consequences of increased meat, eggs and milk consumption on the global environment: Trade/transfer in virtual water and nutrients - CIAP workshop II. Stanford, CA.
- R-10. Wint, W., Chilonda, P., Gerber, P., Robinson, T., Wassenaar, T., 2003. Defining land unsuitable for livestock. Rome, Italy.
- R-11. Jacob, F., Olivos, A., Gu, X.F., Hanocq, J.F., Wassenaar, T., 2002. The INFRAMETRICS 760 airborne Thermal Infrared data of the ReSeDA experiment. INRA CSE, Avignon, France.
- R-12. Lagacherie, P., Cazemier, D.R., Wassenaar, T., Rounsevell, M., 1999. Crop modelling and data spatialisation issues in Languedoc-Roussillon, in: Rounsevell, M.D.A. (Ed.), Spatial Modelling of the Response and Adaptation of Soil and Land Use Systems to Climate Change - an Integrated Model to Predict European Land Use (IMPEL). european Commission, DG-XII, Louvain-la-Neuve, Belgium, p. 210.
- R-13. Hobma, T.W., Hetzer, K., Tentij, M., Vos, L., Wagtendonk, A., Wassenaar, T., Wesselman, B., 1995. Cartographies pédologique et hydrologique de TEAKWOOD I-VIII. Rapport d'expertise pour Flor y Fauna S.A., Costa Rica. Amsterdam.
- R-14. Wassenaar, T., 1995. Roots, their dynamics and distribution. A study on standing stocks and fine root dynamics in Colombian Amazonia. Fondation Tropenbos.

Rapports diplômant :

- RD-1. Wassenaar, T., 2001. Reconnaissance des états de surface du sol en milieu viticole méditerranéen par télédétection à très haute résolution spatiale. Thèse de doctorat. École Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier, Montpellier.
- RD-2. Wassenaar, T., 1997. Analyse numérique de photographies de coupes de sols : étude de cas dans une tranchée à travers la vallée de l'Herault. ENSA.M-INRA, Montpellier.
- RD-3. Wassenaar, T., 1994. Weathering and pedogenesis of the mineral schist soil in the Gavarras, NE Spain: the secondary minerals. Rapport MSc (Partie II), Université d'Amsterdam.
- RD-4. Goosens, M., Wassenaar, T., 1993. Soil genesis on schist in the Gavarras, NE Spain. Rapport MSc (Partie I), Université d'Amsterdam.

7. Logiciels enregistrés

- L-1. Wassenaar, T., Albini, L., David, D., 2015. Logiciel UPUTUC.
IDDN.FR.001.230016.000.R.P.2015.000.30000, Certificat, Agence pour la protection des programmes.

8. Indicateurs bibliométriques

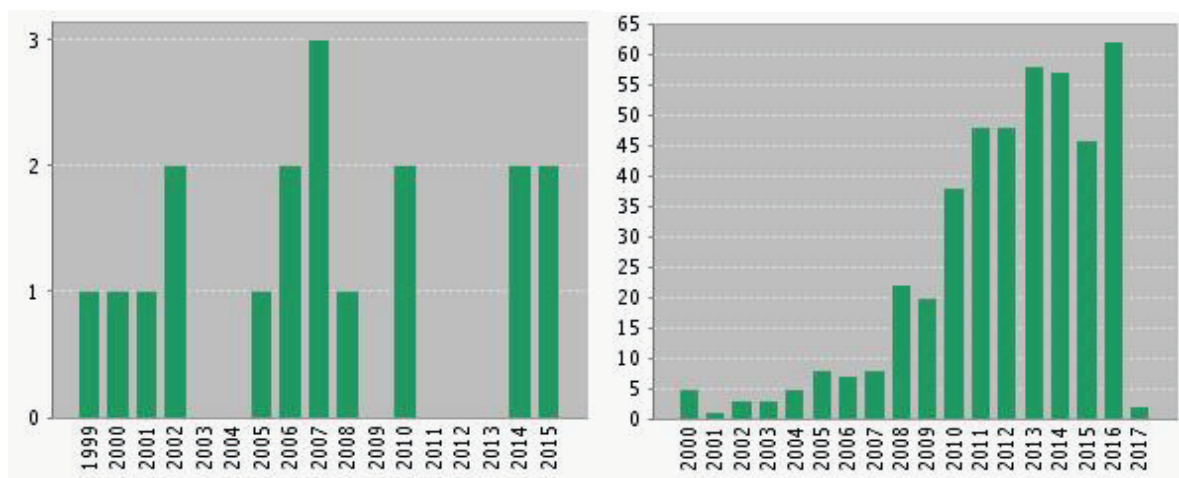


Figure I.2 Production personnelle selon Web of Science, janvier 2017. Gauche : nombre de publications par an. Droite : nombre de citations par an.

La distribution de ma production scientifique répertoriée dans le Web of Science (Figure I.2) montre qu'il s'agit là bien de trois périodes distinctes : une première (1999-2002) liée au doctorat, une seconde (2005-2010) correspondant à mon travail au sein des organismes internationaux (FAO et JRC), puis le début de ma vie de chercheur au Cirad. Du cumul résulte un taux de citation croissant. Google Scholar, trouvant cette même tendance, montre la composition multi-disciplinaire de ce cumul (Figure I.3). Il en résulte un facteur h qui varie en janvier 2017 de 9 (Web of Science®) à 16 (Google Scholar®) en passant par 11 (Scopus®) et 14 (Research Gate®, RG score : 24), en fonction de la production que ces moteurs considèrent.

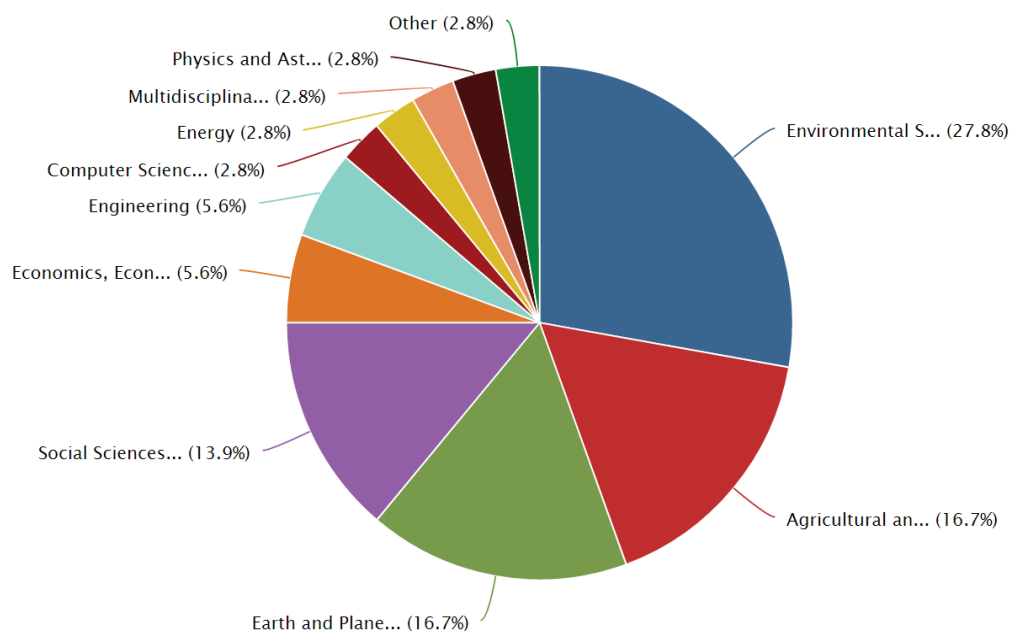


Figure I.3 Classification thématique par Scopus® de ma production répertoriée dans sa base de données, janvier 2017.

D. Travaux encadrés

1. Thèses de doctorat (encadrement)

DUMOULIN, F., 2016. Evaluation environnementale d'un projet de symbiose industrielle territoriale. Application à un projet de gestion territorialisée de résidus organiques valorisés en agriculture dans l'ouest de la Réunion. Thèse de doctorat Université de la Réunion, Ecole Doctorale Sciences, Technologies et Santé.

Soutenance le 7 décembre 2016 devant le jury composé de Valérie LAFOREST et Benoît GABRIELLE, rapporteurs, Sabine HOUOT et Guillaume JUNQUA, examinateurs, Jean-Marie PAILLAT, directeur de thèse, Tom WASSENAAR, co-encadrant de thèse, et Fabienne MULLER, membre invité.

Participation aux comités de thèse :

THEVENOT, A., 2014. Chaîne de valeurs et développement durable d'une filière de production locale : représentation modélisée de la filière volaille réunionnaise. Thèse de doctorat Université de la Réunion, École doctorale Lettres et Sciences Humaines, Droit Économie Gestion, Sciences Politiques.

Soutenance le 23 avril 2014 devant le jury composé d'Alexis PARMENTIER, président, Véronique ALARY et Jean LOSSOUARN, rapporteurs, Jean CHAMPAGNE et Tom WASSENAAR, examinateurs, et Yves CROISSANT, directeur de thèse.

2. Plan de compagnonnage

CESARO, J.-D., 2017. Application de l'écologie industrielle dans le secteur agricole et les systèmes d'élevage à l'échelle des territoires. Chercheurs sénior accompagnant le projet du chercheur junior : Alexandre ICKOWICZ, René POCCARD CHAPUI, Tom WASSENAAR, Guillaume DUTEURTRE.

3. Mémoires de stages niveau M2

RAMIN G., 2014. Conception et réalisation d'un outil permettant le calcul d'impact climatique dynamique à horizon temporel d'une activité territorialisée. Mémoire de Master 2 Informatique, Université de la Réunion, CIRAD, Saint Denis, 41 p.

JOUAN C., 2012. Co-construction d'une filière de valorisation agricole des déchets organiques dans l'Ouest de la Réunion. Mémoire d'ingénieur, ISTOM, CIRAD, Cergy-Pontoise, 91 p.

BOYER J., 2012. Analyse d'une sélection de Composés Organique dans les boues de Stations d'épuration sur le territoire de la Réunion et évaluation éco-toxicologique d'un scénario de valorisation agronomique. Mémoire de Master 2 Sciences de l'Environnement Terrestre, Université Aix-Marseille, CIRAD, 39 p.

GLACHANT A., 2011. Le raisonnement de la fertilisation des principales cultures de l'Ouest de la Réunion. Evaluation des besoins agronomiques de la canne à sucre et des prairies sur le Territoire de la Côte Ouest. Mémoire d'ingénieur, INP-ENSAT, CIRAD, Toulouse, 68 p.

LABORDE C., 2010. Evaluation de circuits de valorisation de résidus organiques à La Réunion – Analyse Coût-Bénéfice de l'échange d'effluents d'élevage de volailles. Mémoire de Master 2 Politiques et Décisions Environnementales, Université Aix-Marseille III, CIRAD, 37 p.

4. Mémoires de stages niveau M1

GAUVIN M., 2013. La valorisation de la matière organique sur le Territoire de la Côte Ouest de la Réunion : Suivis de la production d'échantillons et coordination de la mise en place des essais agronomiques auprès des agriculteurs. Mémoire Licence professionnelle Agriculture et Développement Durable en Milieu Tropical Insulaire, Université de la Réunion, CIRAD, Saint Denis, 55 p.

5. Supervision de sous-traitance

ALBIN L., 2012-2013. Développement informatique du jeu de rôles Feta-Ferti et du modèle de simulation de gestion territoriale de résidus organiques UPUTUC. CIRAD, Contrat de Volontariat de Service Civique, 18 mois.

UR GERE (T.Bioteau, C.Burton, F. Guizieu, J. Martinez), Irstea, 2008. Qualitative assessment of manure management in main livestock production systems and a review of gaseous emissions factors of manure throughout EU27. MARS-IPSC-JRC-CE, contrat n° JRC IPSC/G03/P/JDE/twa D(2008)(9766), 8 mois.

SEGUINI L., 2007-2008. Réalisation de tests d'algorithmes de détection semi-automatique d'arbres de verger sur imagerie satellitaire à très haute résolution. MARS-IPSC-JRC-CE, CDD, 8 mois.

Association réseau RAMIRAN (coord. T. Misselbrook et J. Martinez), 2004-2005. Contribution aux estimations des émissions directes de gaz à effet de serre par l'élevage. Application de la méthodologie IPCC Intégration à l'inventaire mondiale des systèmes de production animale complété avec des pratiques estimées. AGAL-FAO, contrat, 6 mois.

GROENEWOLD J., 2004. Actualisation de la classification et de l'inventaire mondiale des systèmes de production animale et de la base de données statistiques liée. AGAL-FAO, CDD, 6 mois.

II. Mémoire des travaux de recherche

A. Introduction : un positionnement évolutif

Mes premiers pas dans le monde de la recherche, à la fin de mes études universitaires (RD-3, RD-4) et peu après (R-14) avaient pour objet des situations « naturelles ». Si je place ce terme entre guillemets c'est parce que j'ai appris à m'en méfier. Polysémique, ambivalent, voire clivant, et dépourvu de définition rigoureuse, donc d'utilité, je suis même tenté de militer pour son éviction du discours scientifique. J'y reviendrai, mais il conviendrait de lire à la place de ce terme quelque chose comme « situations dépourvues d'intervention humaine récente, directe et intentionnelle ». Depuis ce début-là, ma problématique de recherche, bien que déclinée en diverses opérations, a toujours eu comme objet général d'étude **l'observation de l'environnement aux échelles et au service de sa gestion**. Bien que sans exclusive, j'estime que de telles échelles varient principalement entre une limite « locale » de type parcelle, écosystème ou bassin versant et une limite « globale » de type région continentale, limites bornant la gamme couverte par mes travaux. Avec une prédilection pour l'échelle du territoire constituant désormais un facteur stable de mes travaux. Mais le concept d'environnement n'est quant à lui pas stabilisé, où « gestion » peut se référer à ces entités étrangères que nous ne saurions toucher, à ces ressources que nous mobilisons, et à ces relations qui nous affectent. Mes travaux sont passés des unes aux autres. Ce qui implique une évolution de mon positionnement dans le paysage de la science. Une évolution pas forcément majeure, mais que la forte structuration dichotomique de ce paysage – en sciences de la nature versus sciences de la culture, tant sur le plan épistémologique qu'organisationnel – fait apparaître comme tel. Permettez-moi de clarifier cela par une citation de Philippe Descola (2011) qui, bien que portant sur l'anthropologie, en décrit bien la structure principale :

[...] cette division institutionnelle renforcée entre les sciences et les humanités a aussi eu pour conséquence de rendre bien plus difficile la compréhension des situations d'interface entre phénomènes matériels et phénomènes moraux. [...] et certaines sciences s'intéressant au lien entre les deux sphères se sont retrouvées scindées en deux. Dans l'anthropologie s'opposent deux visions de ce lien : faut-il voir la culture comme un dispositif adaptatif aux contraintes naturelles, et donc explicable en dernière instance par des mécanismes asservis aux lois de la matière et de la vie, ou doit-on voir en elle un ordre de réalité entièrement distincte qui n'entretient que des rapports de type contingent avec le milieu écologique et les exigences du métabolisme humain ? [...] Les deux pôles de la controverse, qui constituent les extrêmes d'un continuum épistémologique, ont le mérite de donner à voir sous une forme particulièrement nette les contradictions dans lesquelles l'anthropologie s'est enfermée lorsqu'elle a posé que le monde pouvait être réparti entre deux champs bien séparés de phénomènes dont il faut ensuite montrer l'interdépendance. [Ce à quoi on répond maintenant par de l'interdisciplinarité : un moyen de réduire les limites de la disciplinarité, ou un retour à la non-disciplinarité ?]

Ce que Descola décrit pour l'anthropologie – tout aussi valable pour la géographie², d'où je viens, et même l'écologie³, dont je me réclame – est plus généralement désigné par « la grande séparation de Snow », d'après un discours remarqué sur les « deux cultures » dans les années cinquante (Snow, 2012), estimant que la division de la vie intellectuelle de la société occidentale en « sciences » et « humanités » serait un obstacle majeur à la recherche de solutions pour notre monde. Le résumé de mon parcours (section I.A) montre que j'ai commencé ma vie scientifique en optant délibérément pour un positionnement du côté « sciences », loin de l'interface artificielle. Je ne détaillerai pas cette période d'études pédologiques, mais je présenterai ci-après quelques travaux d'une seconde phase de recherches, du coup caractérisées comme « environnementales », où je me suis rapproché de cette séparation, d'abord occasionnellement, par la télédétection (II.B), puis avec insistance, par la modélisation (II.C). La fonction qui est la mienne depuis huit ans – initialement intitulé « chercheur en évaluation environnementale » au sein de l'unité Recyclage et risque du Cirad – m'a permis d'explorer un lien permettant de ressouder de petites parties de chaque sphère. Dans une troisième partie (II.D) j'aborde quelques travaux de cette dernière période où j'ai commencé à m'aventurer sur ce lien. La Figure II.1 indique les principaux travaux de ces phases détaillés dans les sections suivantes.

Se pose logiquement la question consistant à savoir si cette tendance se poursuit. Mais cela reviendrait à prétendre à effacer la division, ou à abandonner le territoire de mes compétences. Ni l'un ni l'autre ne me paraît raisonnable. J'escompte rester où je suis et contribuer à renforcer à la fois ce lien et son ancrage du côté des sciences : J'estime ainsi que mon positionnement a atteint sa maturité. Tout en l'ajustant à la marge, il s'agit désormais surtout de le faire *vivre* : de consolider son socle épistémologique et d'appliquer et affiner des méthodes et démarches construites sur cette base. Ce positionnement-là, décrit dans les travaux résumés dans la dernière partie de ce chapitre (II.E), ambitionne de constituer un pont entre les deux rives de l'écologie industrielle. Ce domaine, dont je me revendique, se veut un champ de recherche pluri- et interdisciplinaire, mais aussi une démarche d'action (Abitbol et al., 2014). Cela peut être vu comme une forme de recherche-intervention, car il s'agit d'associer l'implication du chercheur dans des situations de gestion réelles et la formalisation des processus étudiés à travers la conception d'outils de gestion (David, 2000). La production d'information reste donc importante, mais elle considère explicitement ses destinataires. Et puisque je reste de « mon » côté du mur, cette information et les outils qui la produisent ou transmettent restent centrés sur le versant matériel des dynamiques : l'écologie territoriale, défini par le Commissariat général au développement durable comme l'analyse du fonctionnement des territoires au prisme de ses consommations d'énergie et de matières et de leur circulation au sein de celui-ci (Abitbol et al., 2014).

Ce positionnement individuel ne peut être dissocié du collectif dont il dépend et fait partie. Car en centrant mes recherches sur la production d'informations répondant aux besoins des acteurs ainsi que sur la production d'outils à cet effet, un ensemble que je n'assume pas seul, la production de connaissances que cela requiert est l'affaire d'autres membres d'un collectif cohérent. Il m'arrive de

² La classification française du Conseil National des Universités constitue une exception, en apparence, en maintenant la géographie physique avec les « autres » géographies, du coup classée dans un groupe appartenant aux Lettres et sciences humaines. Mais bien peu de chercheurs français s'en réclament, probablement à cause de cela, et on peut y voir une cause de la prédominance – en France – des géosciences et des sciences du vivant dans ce qui relève de cette partie de la géographie.

³ Pour le côté humanités de ce dernier pensez par exemple à l'écologie politique, l'écologie sociale, l'économie écologique ou encore l'écologie industrielle *main stream*.

faire des incursions dans la recherche appliquée, avec une posture post-normale (Funtowicz et Ravetz, 1993), en fonction des besoins d'informations identifiés confrontés aux compétences de ce collectif. Mais il ne s'agit là que d'exceptions ponctuelles. Le fond de connaissances sur les flux dits « biophysiques » d'intérêt au sein d'un territoire est produit par un continuum de recherche puisant jusque dans les profondeurs de la recherche fondamentale. Je ne suis que le passeur de l'information issue de ce continuum, dont la production de connaissance concerne la sélection, le traitement, la mise en forme, voire l'interprétation de cette information, le tout en vue de son utilisation.

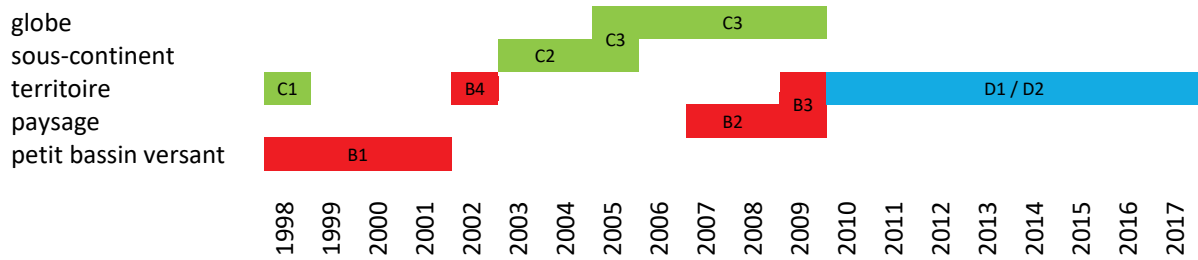


Figure II.1 L'évolution de mon positionnement en termes d'échelle et de démarche. Les codes renvoient aux sections respectives de ce chapitre déclinant les travaux concernés. Les couleurs renvoient à la démarche : rouge : production d'information par télédétection ; vert : production d'information par modélisation ; bleu : recherche « concertée ».

B. Recherches d'observation, fournisseur d'informations territoriales en milieu agricole

Les recherches en observation de la terre par télédétection constituent un domaine appliqué et diversifié. Elles visent à fournir des informations d'aide à la décision en matière de météorologie, de changement climatique, de gestion des ressources, de prévention et de suivi de catastrophes, de reconnaissance militaire... Au sein des recherches dédiées à la gestion des ressources terrestres, la télédétection appliquée à l'agriculture produit elle aussi une diversité d'informations pour autant d'utilisations. On peut y distinguer trois grandes catégories : la gestion de la relation entre l'agriculture et l'environnement (e.g. au travers du changement de l'occupation du sol, les flux hydriques, etc.), le pilotage de la production agricole elle-même (e.g. prévision de récolte, suivi de stress végétal, agriculture de précision, etc.) et l'encadrement du secteur (e.g. droits de plantation, comme jusqu'à peu dans le secteur viticole français, et le contrôle de demandes de subvention dans le cadre de la politique agricole commune, la PAC).

Mes quelques travaux dans ce domaine ont visé chacune de ces trois catégories. Mes premières recherches en matière de fourniture d'informations pour l'aide à la décision concernaient l'état de la surface du sol en milieu viticole (section II.B.1). Cet état de surface constitue une variable clé pour un modèle hydrologique distribué comme MHYDAS (pour Modélisation HYdrologique Des AgroSystèmes ; Moussa et al., 2002) visant la production d'informations thématiques tels que le devenir et le transfert de polluants, ou le transport érosif. Il s'agit de mes travaux de doctorat, donc décrits de manière relativement succincte dans la section indiquée. Plus tard, à l'occasion d'un retour dans ce domaine, il s'agissait de produire de façon relativement automatisée des informations utiles aux instances des Etats membres de l'Union Européenne chargées du contrôle de la PAC (section II.B.2). Le travail décrit dans la section II.B.4 concerne l'estimation d'une grandeur physique, l'évapotranspiration, essentielle pour suivre sur de larges étendues l'état hydrique des cultures. La section II.B.3 concerne un travail qui, bien que ne produisant pas une information directement utile à la décision, explore une possibilité d'améliorer la chaîne de traitement des données rendant la production d'informations en aval plus automatique.

Sur le plan technique la plupart de ces travaux ont en commun de s'appuyer sur l'imagerie dite « à très haute résolution » spatiale, limitant de fait la richesse spectrale à la partie visible du spectre électromagnétique. Ils ont été réalisés à l'époque où ce type d'imagerie commençait à devenir disponible. Mais plus que d'opportunisme il s'agissait là de choix raisonnés découlant des objets d'étude. Ces objets, et la finesse avec laquelle il convenait de les décrire, ne sont *a priori* pas accessibles par la seule voie spectrale, même en y ajoutant la détection « active » (d'ondes émises, e.g radar). Ils ne le sont certainement pas dans les conditions opérationnelles de l'époque (cela jusqu'à ce jour et pour un temps à venir) où la recherche d'une richesse spectrale entraîne rapidement une « dissolution » spectrale de ces petits objets dans leur environnement. Priorité donc à la résolution spatiale pour détecter, morphologiquement, ces objets pour en interpréter autant que possible le peu d'information radiométrique après segmentation.

1. Télédétection de la surface du sol sous culture pérenne

C'est ambitieux de chercher à suivre dans le temps, et à l'échelle d'un bassin versant, l'état de la surface du sol en milieu viticole. Mais il s'agit là d'une des variables réputées les plus déterminantes pour le devenir de l'eau de pluie et de ses effets dans ce milieu où cette pluie tombe de manière irrégulière et intense et dont les sols argilo-limoneux sont sensibles à la formation d'une croûte de surface. La pierrosité, l'enherbement et le labour y sont déterminants de l'infiltration, donc du partage entre transport de solutés vers la nappe et l'érosion par ruissellement de surface.

Son originalité, ce travail de doctorat le tenait de son paradigme : ne pas étudier le potentiel de tel ou tel outil pour aborder l'objet d'étude, mais partir des caractéristiques de cet objet pour déterminer comment et par quel biais au mieux le « télédétecter ». Pour un sol sous culture pérenne cela amenait rapidement à un aveu constituant une seconde – relative – originalité : pas question de prétendre ni de chercher à démontrer que la télédétection puisse, à elle seule, apporter les réponses recherchées. Il s'agit d'une source d'information parmi d'autres, répandues et de plus en plus largement disponibles. Considérer ces autres sources évite d'une part de chercher à détecter ce qui est connu par ailleurs, et d'autre part à mieux exploiter l'information contenue dans les données de télédétection. L'objectif était d'éviter l'écueil des travaux, courants dans le domaine, proposant des « indicateurs » de risque basés sur des relations empiriques entre signal et objet : proposer une chaîne de traitement reproductible permettant *in fine*, et avec une précision qualifiée, de renseigner une variable d'entrée à la modélisation hydrologique. Et cela par une chaîne à déploiement rapide sur une étendue spatiale convenant à cette dernière.

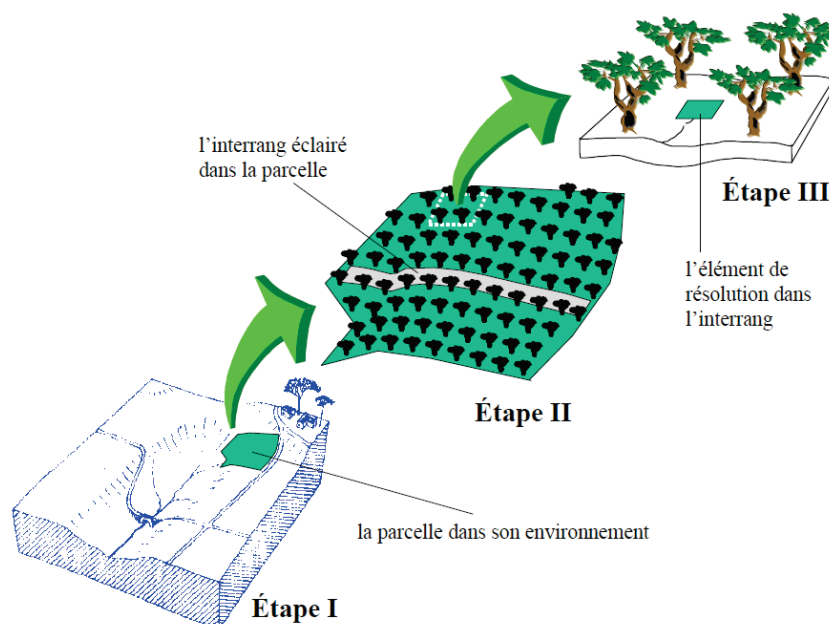


Figure II.2 Etapes de la démarche générale d'analyse de l'imagerie à très haute résolution

Le choix s'est porté sur l'imagerie réflective aisément accessible – au moins dans un futur proche – à résolution spatiale de 25cm minimum. Cette imagerie, acquise par photographie argentique héliportée pour les besoins de l'étude à l'époque mais désormais accessible par satellite à faible temps de revisite, intervenait à plusieurs reprises dans la chaîne suivante (Figure II.2) :

1. **la segmentation du vignoble** : la surface cultivée en vigne peut être détectée grâce au motif régulier et caractéristique de plantation. Mais cartographier proprement la limite entre parcelles distinctes ainsi qu'entre vigne et d'autres occupations du sol reste un challenge dans le milieu méditerranéen très fragmenté. Partant du constat que ces limites étaient connues par ailleurs avec une certitude raisonnable, que ce soit par le cadastre ou le registre parcellaire graphique désormais tous deux disponibles sous forme numérique sur l'ensemble du territoire national, l'approche proposée consistait à segmenter l'imagerie à l'aide de ces entités spatiales numériques. Chaque segment extrait, après un test de l'homogénéité de sa couverture, était ensuite soumis dans son ensemble à une analyse fréquentielle (par transformation Fourier rapide). Cela permet de correctement identifier la quasi-totalité de parcelles de vigne, sans omission – hormis de très petites ou étroites parcelles – ni commission. L'approche présente des intérêts supplémentaires non négligeables : la détection précise du motif de plantation, en termes d'écartement et d'orientation. Ce sont des éléments d'intérêt pour la modélisation, sachant que l'orientation peut être combinée avec l'aspect de l'inclinaison de la surface, lui aussi connu par ailleurs. Ces trois informations détectées alimentent par ailleurs directement la table attributaire de la couverture vectorielle du parcellaire. Elles sont ainsi conservées et disponibles pour des traitements ultérieurs (A-18, A-19) ;
2. **la segmentation de l'inter-rang éclairé au sein du vignoble** : Cette première étape de ce qui constitue une approche stratifiée permet ensuite de tirer profit de la réduction de complexité obtenue : nous savons désormais que le jeu de pixels restant appartient au vignoble. Le sous-ensemble d'intérêt est celui des pixels dont le rayonnement provient entièrement de la surface du sol dépourvue d'ombre portée. Aucune approche par seuillage radiométrique ne permet d'isoler ces sous-ensembles en toute circonstance malgré la simplification de milieu obtenue. La connaissance de la structure spatiale du milieu offre une sortie originale. Par vignoble, le sous-ensemble d'intérêt peut être délimité indépendamment de toute sa variabilité spectrale interne – une condition forte car cette variabilité-là est déterminée par l'état de la surface recherché : après lissage de l'image de la parcelle par des filtres médian de tailles déterminées (3×3 et 5×5), la différence entre les deux permet de localiser les objets d'intérêt. Ceux-ci sont ensuite correctement délimités par une procédure itérative d'érosion et de dilatation (A-20) ;
3. **la reconnaissance de l'état de la surface du sol** : la chaîne de traitement stratifiée se termine par la considération de l'information spectrale au sein de l'objet d'intérêt délimité. Or, cette information n'est pas seulement très pauvre, mais en plus elle n'informe que pour partie sur l'information recherchée. Elle informe par exemple pour partie sur des aspects de la minéralogie de la surface du sol, comme sa richesse relative en oxydes de fer, sans rapport avec ses caractéristiques hydrologiques. Et à l'inverse, certains états de la surface du sol hydrologiquement très contrastés ne le sont pas toujours sur le plan spectral. L'information d'intérêt s'y trouve au moins autant voire plus contenue dans l'intensité du signal spectral que dans sa forme et cette intensité dépend pour certains types d'état de surface très fortement des conditions géométriques d'observation. L'approche qui s'imposait consiste donc d'une part en la prise en compte de cette géométrie et d'autre part en une classification floue indiquant pour un signal donné les types d'états de surface correspondants possibles (A-17). Des mesures radiométriques sur le terrain permettaient de paramétrer un modèle bidirectionnel robuste, i.e. performant sur des types de surfaces variés, pour chaque classe d'état de surface. L'ensemble de ces paramétrages par classe permet ensuite de calculer une

gamme de réflectances correspondante pour toute configuration géométrique, l'ensemble de ces gammes fournissant les classes spectrales pour cette configuration-là, dont la signification hydrologique peut être floue ou pas. La procédure de classification radiométrique des ensembles de pixels d'intérêt de l'ensemble des vignobles d'une scène considère donc, au-delà des réflectances des canaux rouge et vert, les angles zénithaux de vue, l'écart entre les angles azimutaux de vue et d'éclairement, la pente du terrain, l'orientation de la pente, la date et l'heure. Bien que robuste, l'application de cette procédure sur un bassin versant indiquait qu'une majorité des pixels éclairés correspondait à une classe floue. La répétition des observations dans le temps permettrait d'identifier l'état de surface concerné.

2. La détection semi-automatique d'objets végétaux dans l'imagerie à très haute résolution de paysages agricoles

Doter la reconnaissance par ordinateur d'une capacité comparable à celle de l'œil humain reste un graal en télédétection. Sur l'imagerie à très haute résolution, et *a fortiori* sur l'imagerie panchromatique – atteignant la plus haute résolution au sacrifice de l'intégration de toute information spectrale en une intensité unique – l'œil humain ne peut se servir que d'informations contenues dans l'arrangement spatial des pixels d'une scène. Ces informations restent malgré tout de natures et d'ordres très variés, dont certaines sont difficilement formalisables. Mais pour des milieux de composition relativement simple, la riche palette de modèles et d'algorithmes du domaine du traitement d'image et du signal disponibles pour ce type d'imagerie suscite l'espoir de pouvoir se rapprocher de ce graal. On peut y distinguer deux types de communautés qui suivent des démarches distinctes : des praticiens provenant de domaines thématiques privilégiant la robustesse de méthodes relativement simples – ce dont je faisais partie comme la section précédente en témoigne – et des mathématiciens explorant le pouvoir de la science formelle à reproduire la logique de la perception humaine. Les deux collaborent ou s'affrontent peu, se regardant plutôt en chiens de faïence : les seconds tendent à estimer que les premiers arrivent à leur choix par défaut de savoir concevoir des algorithmes plus justes, là où les premiers doutent que les outils des seconds passeront la validation expérimentale. J'ai quant à moi eu l'occasion d'aller à l'encontre de « l'autre » communauté, pour confronter les outils ou pour mutualiser les savoir-faire.

a) La détection d'arbres de verger

Dans le domaine agricole, une quête ancienne de la télédétection à très haute résolution spatiale est celle de la détection automatique de l'arbre dans le champ ou verger, que ce soit à des fins de gestion ou de contrôle. Depuis l'avènement de l'imagerie panchromatique satellitaire à résolution de l'ordre du mètre dans les années 1990 plusieurs méthodes et outils semi-automatiques – nécessitant la calibration de quelques paramètres par image ou parcelle – se voulant opérationnels ont été conçus. Les comparer par un vaste contrôle expérimental de leurs performances (R-5) paraissait prometteur en termes d'enseignements. Cinq modèles ont été sélectionnés à cet effet :

- Kay et al. (1998) proposaient un modèle essentiellement morphométrique pour l'identification de houppiers. Ce modèle simple nécessite de déterminer quatre paramètres par parcelle, liés à l'intensité du signal et la taille des objets d'intérêt, pour identifier et ensuite délimiter ces derniers ;
- Le modèle de Masson et al. (2004) est principalement une amélioration du précédent, cherchant à en réduire le besoin d'entraînement assisté. Il s'agit d'une approche par analyse morphologique d'image basée sur les minima régionaux. Elle nécessite de déterminer trois paramètres par scène ;
- Dans le plus simple des modèles, Robbez-Masson et Foltête (2005) s'appuient sur deux filtres circulaires de taille distincte, obtenant les objets d'intérêt par le seuillage de la différence entre les deux moyennes. Cela représente donc également trois paramètres à déterminer ;
- Horváth et al. (2006) ont développé un modèle mathématique probabiliste utilisant moins de connaissance experte que les précédents. Ce modèle « gaz de cercles » – collections de segments plus ou moins circulaires, proches mais non recouvrant – s'appuie sur le concept

mathématique de contours actifs d'ordre élevé et évalue la probabilité du résultat par une fonction d'énergie. L'ensemble nécessite de déterminer sept paramètres ;

- Dans un cadre stochastique, Perrin et al. (2006, 2005) mobilisent le processus de points marqués. Parmi les diverses collections d'objets géométriques, le minimum global d'énergie est déterminé par une méthode de Monte Carlo par chaînes de Markov dite « à saut réversible ». Déterminant certains paramètres lui-même par apprentissage, le modèle ne demande que seulement deux paramètres soient déterminés par l'utilisateur.

	<u>1</u> - Regular motif, few missing plants	<u>2</u> - Regular motif, large patches of missing plants	<u>3</u> - Irregular motif, homogeneous distribution	<u>4</u> - Irregular motif, heterogeneous distribution
A - uniformly well developed and separated objects (mature trees with full foliage, well separated crowns)				
B - uniformly well developed but touching objects (mature trees with full foliage, touching crowns)				
C - uniformly under-developed objects (young trees / vine / uncomplete leaf unfolding)				
D - variably developed objects (mixed species / ages / sanitary status)				

Figure II.3 Schematic representation of orchard typology (R-5).

L'ensemble de ces modèles a été utilisé sur 144 oliveraies provenant de 14 sites situés dans 6 pays, représentant 12 classes de motifs spatiaux (Figure II.3). Les résultats ont été jugés par comparaison à une « vérité terrain » établie par photo-interprétation (Figure II.4). Ils révèlent un fort contraste entre d'une part les hypothèses simples sous-jacentes à ces modèles et la maigre source d'information que constitue la bande panchromatique, et d'autre part la forte variabilité de l'ensemble des attributs spatiaux des vergers, même à courte distance. Tous les modèles atteignent leurs meilleurs résultats sur des vergers bien développés au motif régulier et homogène, mais la justesse globale d'aucun des modèles n'atteint 70%. Quatre des cinq modèles révèlent une performance globale très proche malgré la grande diversité de leurs approches. Ce que cela suggère est que dans les conditions données où il n'y a que peu d'information disponible, considérée qu'à une échelle très locale, recourir à des modèles sophistiqués est peu utile. Faire mieux dans une réalité fort complexe requiert l'insertion de ces

modèles au sein d'un « système de compréhension d'image » à architecture stratifiée hiérarchique (Shackelford et Davis, 2003a, 2003b). Cela permettrait de combiner des approches ascendantes par segmentation générique avec des approches descendantes de reconnaissances de motifs par modèle d'objet. Ce n'est que dans un tel contexte que le potentiel des modèles mathématiques, capables de considérer de l'information à plus longue distance et d'estimer eux même par apprentissage certains paramètres, pourra leur donner un avantage décisif dans un contexte opérationnel.

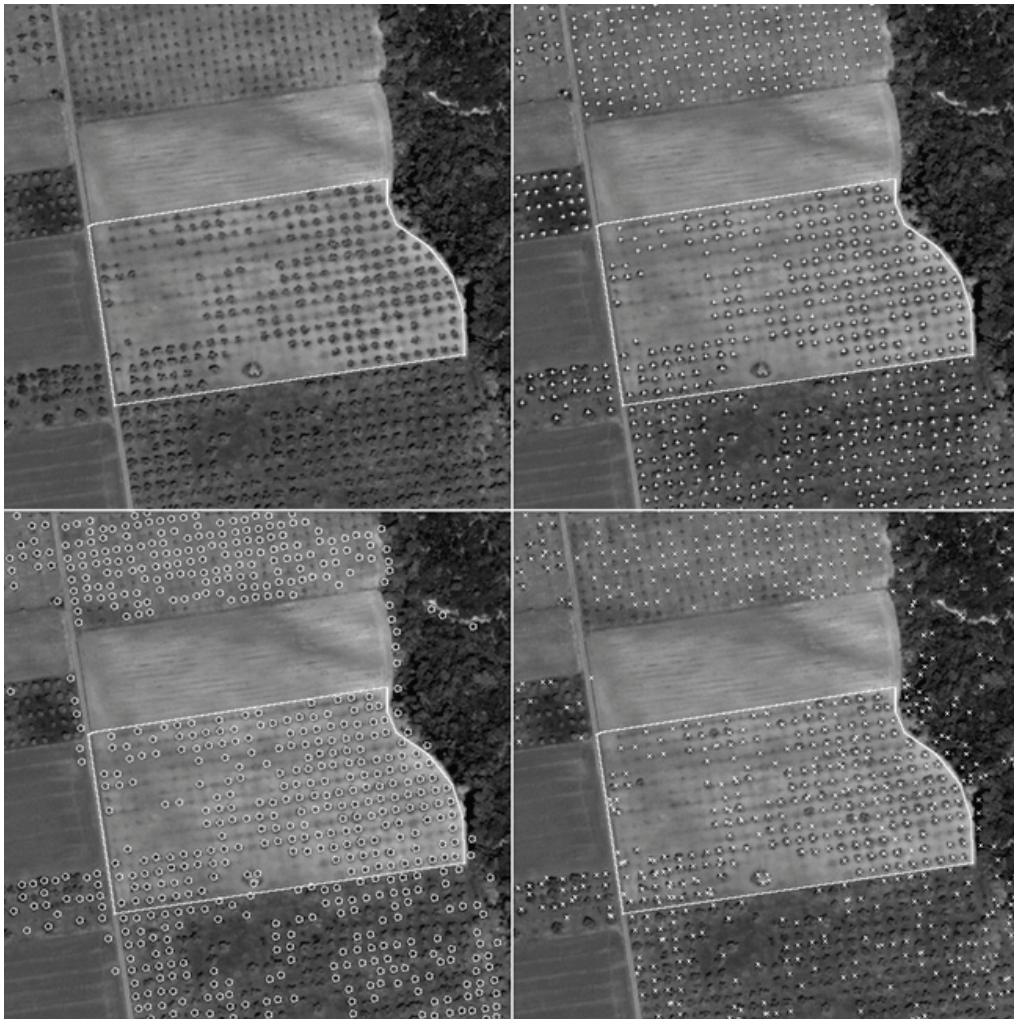


Figure II.4 ALMO site, northeast Spain. Upper left: 500x500 pixel area extracted from the 801x801 pixel test image, showing the center orchard outline in white; upper right: CAPI identified individual tree 'ground truth' displayed on top of the image; lower left: MPP model results depicted with white circles (center orchard: 100% sensitivity, 96% accuracy, error tolerance of 3% at 95% confidence interval; 83% sensitivity, 75% accuracy on the remaining part of the image, error tolerance of 2% at 95% confidence interval); lower right: Morpho model results depicted with white crosses (center orchard: 97% sensitivity, 80% accuracy, error tolerance of 5% at 95% confidence interval; 67% sensitivity, 48% accuracy on the remaining part of the image, error tolerance of 3% at 95% confidence interval) (R-5).

b) La détection de haies dans le paysage agricole

Suite à la confrontation d'approches décrite ci-dessus, et dans le but d'assister la vérification du respect de certaines mesures agro-environnementales de la politique agricole commune, j'ai établi une collaboration avec un groupe de recherche en traitement d'image de l'Université de Bilkent (Ankara, Turquie). Il s'agissait d'étudier le potentiel des techniques de ce domaine pour télédétecter des objets plus complexes que les arbres de verger : les haies. Car les boîtes à outils classiquement utilisées par les télédétecteurs thématiciens dans ce genre de tâche de segmentation en imagerie à très haute résolution se caractérisent par un degré très élevé d'assistance/supervision de la part de l'utilisateur, limitant fortement leur intérêt dans un contexte où cette tâche est répétitive et exécutée sur des étendues (i.e. nombre d'images) très importantes et variées. Pensez là e.g. à eCognition® ou la boîte à outil ORFEO du CNES.

La démarche novatrice mise en œuvre est sur le principe proche de celle de Shackelford et Davis (2003a, 2003b), préconisée ci-dessus à la suite du travail sur la détection d'arbres : une approche hiérarchique multi-échelle et multi-caractéristique exploitant l'information spectrale, texturale et morphologique pour progressivement et automatiquement identifier ces éléments linéaires et boisés

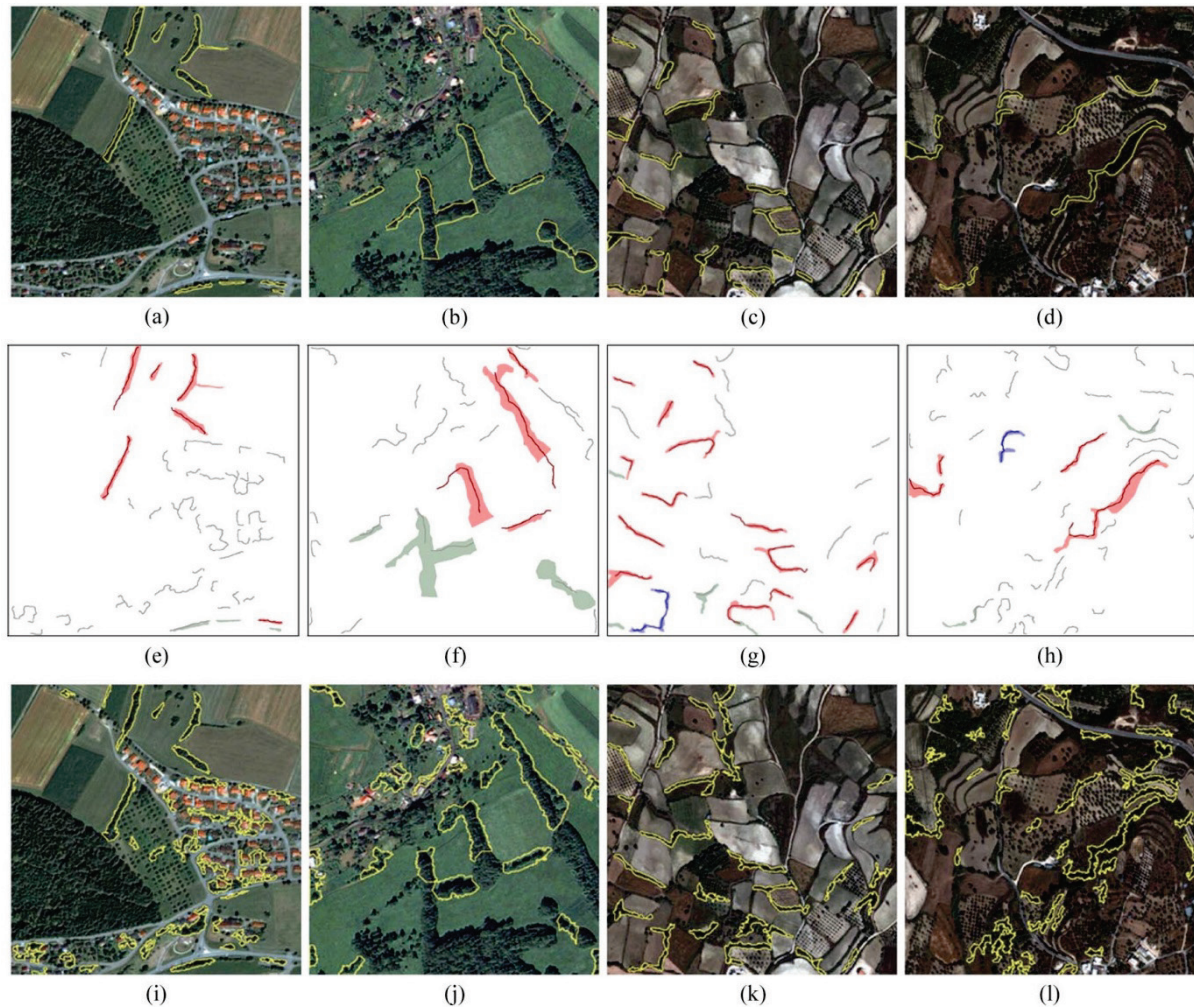


Figure II.5 Example results for hedge detection. The first row shows the object-level ground truth. The second row shows the segment classification according to the object-based performance measures. The ground truth objects that are (red) correctly detected, (green) overdetected, (blue) underdetected, and (gray) missed are shown as regions. The algorithm outputs that correspond to (red) correct detections, (green) overdetecteds, (blue) underdetecteds, and (gray) false alarms are shown as overlaid skeleton segments. The third row shows the detected objects overlaid on the visible bands (A-9).

des paysages, testée sur 33 portions d'une image QuickBird d'un paysage allemand, tchèque et chypriote (A-9, Pr-3). Un ensemble de caractéristiques spectrales et texturales sont calculés par pixel, suite à quoi des fonctions discriminantes entraînées sur des combinaisons de ces caractéristiques pour sélectionner les pixels appartenant potentiellement aux cibles. Une analyse de composantes connectées appliquée à cet ensemble fournit les objets candidat. Une seconde contribution était un nouvel algorithme capable d'identifier des structures linéaires au sein des segments candidat (Figure II.5). La squelettisation au cœur de cette procédure-là permet de quantifier la linéarité de la structure ainsi que son uniformité. Et les caractéristiques de longueur et de largeur peuvent aisément être ajustées, ce qui est très important pour un objet cible dont la définition réglementaire précise risque fort de varier entre pays et régions.

3. La classification spectrale automatique d'imagerie à haute résolution

En fin d'introduction de la présente section B je déclarais « Priorité donc à la résolution spatiale pour détecter, morphologiquement, ces objets pour en interpréter autant que possible le peu d'information radiométrique après segmentation ». Mais priorité à la résolution spatiale n'équivaut pas nécessairement à la primauté de la morphologie dans la chaîne de traitement ! L'approche la plus rigoureuse partirait du constat que l'information contenue dans les motifs spatiaux, tout comme celle contenue dans la radiométrie sont loin de pouvoir identifier, dans l'absolu, à elles seules, un quelconque type d'objet d'intérêt. Pour la télédétection qui se veut générique, et qui ne souhaite donc pas mobiliser – donc dépendre – d'autres données et informations spatialisées, une telle approche exploiterait de manière la plus intelligente possible ses deux axes d'information – ou trois axes pour certaines séries d'images donnant dans une certaine mesure accès au temps. Cela paraîtra une évidence à ceux qui ne sont pas de cette communauté, mais il se trouve que celle-ci est assez nettement séparé en deux : une dite de télédétection quantitative, cherchant à estimer des grandeurs physiques et ne s'intéressant peu ou pas à la segmentation et la classification, et une plus géographique, cherchant à cartographier des espaces pour un thème donné. C'est cette dernière que nous avons considérée jusqu'ici. Logiquement, l'imagerie à très haute résolution spatiale est surtout prisée par cette communauté-là où ce qui est en vogue en terme méthodologique est l'analyse à base d'objet, ou OBIA (object based image analysis), avec certains fournisseurs de boîtes à outils influençant fortement et de longue date l'orientation scientifique. L'opérationnalité de telles boîtes à outils, comme celle d'eCognition déjà cité ci-dessus et considérée comme l'état de l'art en OBIA, laisse pourtant à désirer, tant en termes d'aisance d'usage, d'efficacité, d'efficience, de robustesse, de rapidité, de reproductibilité...

Dans une collaboration avec Andréa Baraldi au JRC nous concluons que les problèmes de segmentation d'image sont mal-posés et difficilement solubles (A-10). Comme illustré par les travaux de Shackelford et Davis (2003a, 2003b) précédemment cités et indiqué par les principes d'un système de compréhension d'image édictés par Marr (1982), la classification d'une image en segments correspondant à des objets selon des modèles de ces objets est nécessairement stratifiée et hiérarchique, tel un arbre de décision. Surtout, une telle classification devrait se faire sur la base, donc après, une étape préliminaire de classification des pixels, les classant au mieux selon la seule information au niveau de ce primitif : pas la peine en effet de chercher à savoir si un pixel donné appartient à tel ou tel objet si sa radiométrie l'exclut !

Shackelford et Davis produisent cette « cartographie préliminaire » par une classification floue par maximum de vraisemblance, i.e. une procédure dite « assistée » et spécifique à l'image traitée : une approche peu satisfaisante dans un contexte de segmentation opérationnelle. Une cartographie préliminaire réellement robuste et automatique doit, forcément, se libérer de la relativité de l'information spectrale. Cela continue de constituer un obstacle majeur, comme en témoigne l'utilisation de l'indice normalisé de végétation – un rapport entre les canaux rouge et proche infrarouge – pour séparer ce qui est végétation de ce qui ne l'est pas, toujours prépondérante en télédétection haute résolution appliquée à l'agriculture, et pourtant nullement robuste ni transposable. Andréa Baraldi avait pourtant développé une procédure de classification radiométrique

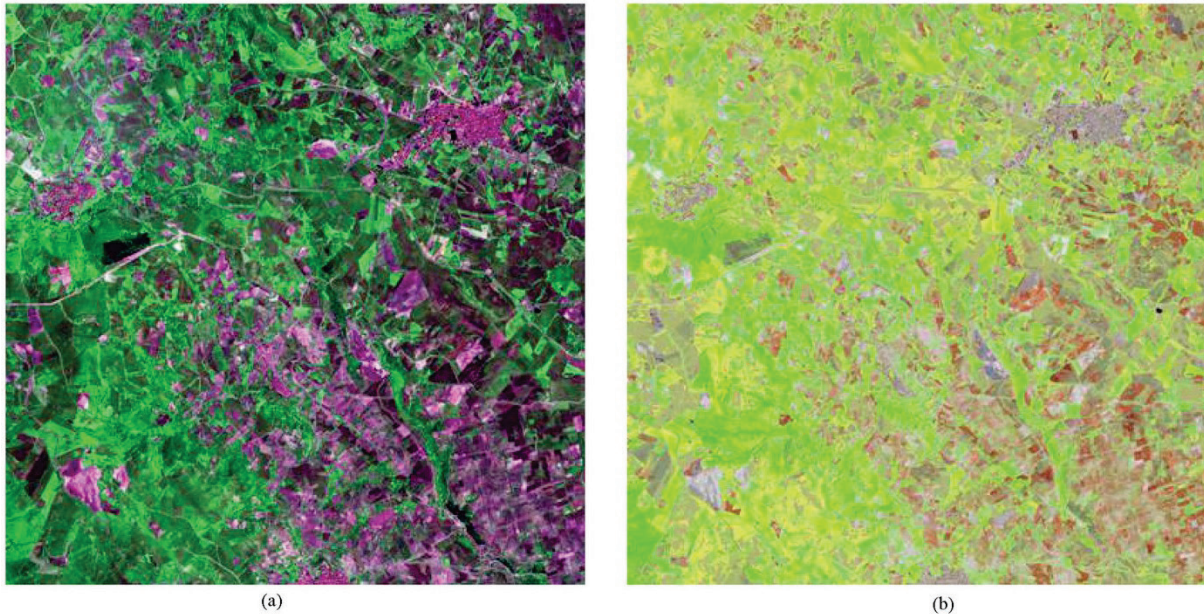


Figure II.6 (a) QuickBird-2 image of Campania, Italy (acquisition date: June 13, 2004, 09:58 GMT), radiometrically calibrated into TOARF values, PAN-sharpened from 2.44 to 0.61 m resolution and depicted in false colors (R: band 3, G: band 4, B: band 1). (b) ISRC output map depicted in pseudocolors and generated from the MS image shown in (a). The adopted pseudocolors are the following: green tones for vegetation and rangeland, brown and gray color shades for barren land and built-up areas, blue tones for water types, white tones for clouds and snow, and red tones for unknowns (A-10).

automatique floue tout à fait robuste⁴, dont la seule exigence est que l'imagerie en entrée ait été calibrée sur le plan radiométrique, permettant de disposer d'une information sur la réflectance au sommet de l'atmosphère représentée par le pixel. Initialement établie pour l'imagerie à plus faible résolution, spectralement plus riche, le principe du classificateur est simple : il s'agit de constituer une table de correspondance aussi importante que possible entre réflectances et vérité terrain, alimentée par un historique de classifications assistées, i.e. une base de données que toute la communauté pourrait venir enrichir. Le classificateur « apprend » sur cette table pour s'exprimer pour toute configuration radiométrique donnée sur les types de surface pouvant correspondre à une réflectance donnée. Après adaptation de cette table de correspondance à la plus pauvre information spectrale de l'imagerie à très haute résolution (4 canaux) – réduisant le nombre de semi-concepts, et donc le nombre de classes, pouvant être distingué de 46 à 25 – nous avons pris l'initiative de tester/démontrer la faisabilité et l'intérêt de ce classificateur préliminaire automatique en l'appliquant à un large éventail d'images Ikonos et QuickBird (A-10, Figure II.6). Le passage de l'information spectrale de type Landsat (7 bandes) à celle de type Ikonos (4 bandes) signifie surtout la perte des bandes dans le moyen infrarouge utiles pour l'identification de végétation chlorophyllienne. Il s'agissait donc surtout de savoir si et à quel point la performance du classificateur à quatre bandes spectrales était moins performant que celui à sept bandes dans la reconnaissance de la végétation.

Pour tester son utilité dans le cadre du contrôle de la PAC nous lui avons fait classifier 14 images satellitaires à très haute résolution, distribuées au travers de paysages agricoles de l'Union Européenne représentant sa diversité de cultures et de sols. L'analyse des résultats a montré que la reclassification des semi-concepts en un masque binaire végétation vs. non-végétation produit une

⁴ Le LSRC (*Landsat-like Spectral-Rule based Classifier*) de Baraldi et al. (2010), classifie automatiquement la réflectance de sept bandes spectrales dans une catégorie d'un ensemble de classes mutuellement exclusives et conjointement exhaustives, cf. au critère de Congalton (1991). Il s'agit de semi-concepts à base spectrale qui constituent des conjectures sémantiques appartenant à six catégories mères : nuage, neige ou glace, eau ou ombre, végétation, sol nu ou construit, valeur aberrante.

cartographie très adéquate de ce que nous reconnaissons comme étant de la végétation. La comparaison aux résultats du classificateur à 7 bandes spectrales révèle surtout une différence de signification sémantique des deux masques : là où le premier différencie les pixels présentant une large proportion de végétation chlorophyllienne de ceux en ayant peu, le second classe tout pixel présentant quelque portion de biomasse chlorophyllienne comme « végétation ».

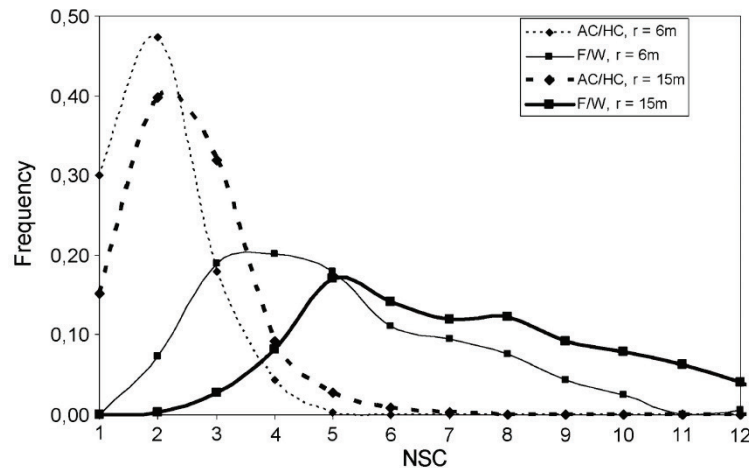


Figure II.7 Distribution of the NSC [number of spectral classes] detected within 6- and 15-m-radius neighborhood overlapping with vegetation spectral categories detected by IRSC per class: 1) AC/HR [annual cropland or herbaceous rangeland] and 2) F/W [forest or woodland] (A-10).

Dans une dernière partie de ce travail nous avons illustré une utilisation originale de cette classification préliminaire dans une seconde étape originale d'un système de compréhension d'image. Il s'agissait de calculer des caractéristiques de texture non pas dans le domaine traditionnel, subsymbolique et à variation continue, mais dans le domaine symbolique et discret de cette classification préliminaire elle-même ! Le passage à de plus hauts niveaux sémantiques est ainsi facilité par la réduction de dimensionnalité que représente cette première étape de passage de réflectances en semi-concepts. Dans la partie « végétation » du masque la dernière élimine en effet une très grande partie de la variation au sein de parcelles agricoles et de prairies, mais en maintient nettement plus en forêt ou broussailles. Ainsi la Figure II.7 montre qu'en appliquant un simple seuil sur la diversité de classes (semi-concepts) rencontrée dans un voisinage de 15m dans cette partie du masque, un pixel peut être classé comme appartenant à l'un ou l'autre concept avec une confiance tout à fait respectable (A-10).

4. Estimation de l'évapotranspiration par télédétection à moyenne résolution

Une fois la surface agricole localisée et/ou une fois la végétation et le sol spatialement séparés, la télédétection est souvent appelée à l'aide pour suivre l'un ou l'autre. Elle constitue un moyen pour estimer, dans le temps et l'espace, certaines variables de modèles de transfert entre sol, végétation et atmosphère (SVAT) permettant aux agronomes de suivre les transferts de masse et d'énergie. Tel était l'objectif du projet européen ReSeDA, focalisant sur les Alpilles, un site agricole de 25 km² contenant une diversité de cultures annuelles dans des parcelles d'une taille moyenne de 4 hectares, auquel j'ai brièvement contribué (Pr-4, R-11). Mais estimer des grandeurs physiques nécessite d'assimiler des données provenant de différents capteurs et, comme indiqué précédemment, l'acquisition de certaines données radiométriques – notamment au-delà du visible dans le spectre électromagnétique – ne peut se faire qu'au dépens de la résolution spatiale.

L'évapotranspiration journalière est un facteur clé dans le suivi des besoins en eau d'une culture et son intégration au cours du cycle physiologique est étroitement liée au rendement. Nombreux sont donc ceux qui ont tenté de l'estimer, par des approches principalement semi-empiriques comme des approches résiduelles par bilan énergétique : ce flux de chaleur latente peut être estimé en soustrayant les flux de chaleur sensible et celui du sol du rayonnement net. Intégré sur la journée, le flux de chaleur du sol est généralement estimé nul. Le flux de chaleur sensible peut quant à lui être estimé par des modèles qui font intervenir diverses données télédétectées (e.g. pour estimer l'albédo et la température de surface). Mais les recherches dans le cadre de ReSeDA montraient que l'estimation à l'aide d'un modèle s'appuyant exclusivement sur des données télédétectées restait plus que délicate (Pr-6). Une complication supplémentaire est que la variable d'intérêt est journalière, là où la télédétection ne fournit qu'une information instantanée. Pour y remédier, Seguin et Itier (1983) ont depuis fort longtemps proposé leur « relation simplifiée », largement utilisée depuis, permettant de s'appuyer, par une relation statistique, sur une mesure de température de surface et de rayonnement net à midi pour l'estimation approximative de flux journaliers. Les mesures de terrain acquises dans le cadre de ReSeDA m'ont permis de remplacer les constantes statistiques proches du flux de chaleur sensible et du flux de chaleur du sol par des relations à variation annuelle (Pr-5).

Mais l'essentiel de ce travail concernait l'impact de la faible résolution spatiale de données télédétectées sur la fiabilité de l'estimation de l'évapotranspiration : les équations physiques sont conçues pour des estimations ponctuelles, supposément situées dans une espace uniforme, tandis que les pixels intègrent le rayonnement provenant d'une surface hétérogène. A l'aide de données à une résolution de 20 m obtenues par des capteurs aéroportés, j'ai étudié différentes méthodes de changement d'échelle pour estimer les paramètres requis à une résolution de 1 km, i.e. celle d'un capteur thermique satellitaire comme AVHRR. La réponse de l'estimation de l'évapotranspiration journalière à ce changement d'échelle se révèle en effet fortement non-linéaire (des erreurs de plusieurs dixièmes de mm/jour) et particulièrement sensible à la manière dont la rugosité effective de surface est estimée. La moyenne logarithmique des rugosités de surface à l'intérieur du pixel permettait de limiter l'erreur de non-linéarité induite par le changement de résolution à 0,1 mm/jour en moyenne.

5. Regard critique sur ce parcours en recherches d'observation

Les enseignements qui découlaient de mes recherches de doctorat (section II.B.1) ont constitué des leçons cardinales pour la suite : Ils ont grandement influencé l'orientation des travaux réalisés ensuite, qui eux n'ont fait que confirmer et consolider ces enseignements, avant de me conduire à mettre fin à cette période :

- L'apport principal de ces travaux initiaux, réalisés à une époque où la tendance à « vendre » la télédétection comme un outil quelque peu « magique » était forte, réside dans la démonstration que la reconnaissance de ses limites peut lui permettre de trouver sa place en tant que source d'information parmi d'autres. Et qu'à cette place-là, ces autres sources permettent à l'imagerie de télédétection de bien mieux exploiter l'ensemble de son potentiel d'information propre à elle-même, et cela à l'aide de procédures de traitement automatiques. Un message adressé à la communauté scientifique elle-même, qui me semble ne pas avoir rencontré un écho significatif. La faute à une voix peu audible, et sans doute trop peu et mal employée ;
- Ces travaux mettent également le doigt sur la nécessité d'une procédure stratifiée pour exploiter ce potentiel d'information sur un objet d'intérêt donné, tel que procède la vision humaine dont la reproduction reste toujours l'idéal de la télédétection à très haute résolution. Un autre point mis en exergue par ces travaux-ci est la nécessité de pouvoir disposer d'imagerie à la radiométrie calibrée, chose qui n'était (n'est ?) nullement monnaie courante dans ce secteur, et au-delà la nécessité de préserver toutes les métadonnées concernant les conditions d'acquisition (e.g. géométrique, temporelle). Les travaux présentés dans les sections II.B.2 et II.B.3 revenaient sur l'ensemble de ces points, constituant des fronts d'une bataille qui, je crois, n'a nullement été gagnée à ce jour ;
- Reste l'éternelle question de l'opérationnalité de la télédétection : les procédures de traitement de l'imagerie ont beau être automatisées et nécessiter peu ou pas d'assistance, et l'imagerie à très haute résolution a beau être de plus en plus largement disponible contre un coût peut-être plus abordable qu'avant, l'acquisition d'un jeu de données propre reste une étape fastidieuse, affaire de spécialiste. Puis, surtout, la flexibilité temporelle de cette acquisition reste une limite forte pour le domaine thématique en question : En Méditerranée, les viticulteurs, à l'écoute des prévisions météorologiques, interviennent souvent dans leurs parcelles peu de temps avant les événements pluvieux. Pour la modélisation des flux, même si ce n'est que la calibration du modèle, il est donc primordial de pouvoir disposer d'imagerie, remplissant les conditions indiquées, acquise peu avant/après des événements rares et peu prévisibles...

Les travaux qui ont suivi ont permis d'affiner ces enseignements et d'explorer certaines voies très prometteuses. Ainsi les algorithmes sophistiqués, élaborés, pour la détection de formes (section II.B.2) paraissent fort prometteur, à conditions de les déployer dans des conditions appropriées, i.e. à un stade avancé d'une chaîne d'analyse nécessairement assez longue. Et les travaux de la section II.B.3 indiquent que des perspectives concrètes existent pour améliorer et automatiser les étapes initiales d'une telle chaîne. Une telle capacité de détection d'objets aurait ensuite, au-delà de son intérêt propre, clairement vocation à contribuer à l'estimation de variables physiques entrant, avec d'autres

parfois fournies par la télédétection à moins haute résolution spatiale, dans des modèles d'estimations de grandeurs physiques d'intérêt agronomique.

A condition de s'engager sur une telle voie, il me semble que la télédétection aurait donc un grand potentiel de *contribuer* à informer efficacement le secteur agricole dans chacune des trois catégories indiquées en introduction : la gestion de la relation entre l'agriculture et l'environnement, le pilotage de la production agricole elle-même et l'encadrement du secteur. Ce potentiel serait seulement, mais structurellement, contraint par son coût et sa souplesse de mis en œuvre. Deux aspects qui suggèrent que la réalisation de ce potentiel serait plus probable pour la dernière catégorie, et nettement moins pour la première.

Et si la télédétection à très haute résolution pour l'agriculture s'avance sur une telle voie, quelle en serait la conséquence pour la contribution d'un chercheur « thématique » tel moi-même ? L'opérationnalisation, et donc son transfert à des opérateurs non-scientifique, pourrait intervenir rapidement, car la conception de chaînes de traitements à partir d'éléments disponibles serait une question d'ingénierie. Les grands domaines de recherche restant seraient l'affinage des techniques de détection et de description d'objets, affaire de mathématiciens, et de l'estimation de grandeurs physiques, affaire de physiciens.

C. Analyse et modélisation de relations agriculture – environnement, à l'échelle régionale et au-delà : des diagnostics pour cibler l'action territoriale

La section précédente concerne un ensemble de travaux de production d'informations spatialisées portant sur l'agriculture. Bien que certaines de ces informations fussent directement destinées à un utilisateur final (II.B.2), la plupart renseignait des travaux ultérieurs de *modélisation*. J'apprécie peu ce terme car employé bien trop largement sans désigner rien de précis. A bien y réfléchir, tout ce que nous faisons relèverait de la modélisation, même au-delà de la recherche car le moindre mot est un modèle. En parlant de *modélisation* je me réfère ici aux calculs assistés par ordinateur, faisant généralement intervenir des outils informatiques et/ou des algorithmes préétablis, pour s'exprimer sur des phénomènes qui ne peuvent être appréciés autrement, soit parce qu'ils n'ont pas encore eu lieu, soit parce que leurs caractéristiques – spatiales notamment – empêchent leur mesure directe. Et dans ces travaux cette modélisation constituerait la dernière étape d'une chaîne de recherche, de production de connaissances qui se destine quant à elle à informer des utilisateurs.

Comme dans le cas du modèle MHYDAS auquel se destinaient mes travaux de doctorat (II.B.1), cette modélisation concerne dans la recherche agronomique très souvent un aspect de la relation entre agriculture et ce que nous appelons environnement. C'est là un domaine tellement vaste que dès que l'on accepte de séparer ces deux concepts on est forcé d'avouer qu'ils sont inextricablement liés. Il me concerne pleinement au titre de la fonction qui est la mienne au Cirad, mais dans la présente section je mets en avant quelques travaux de modélisation précédant cette période actuelle. Ils relèvent de relations agriculture-environnement diverses, mais ont en commun de s'exprimer sur ces relations à une échelle géographique relativement petite afin de cibler l'attention – plus que directement l'action – de l'utilisateur pressenti. Plusieurs de ces travaux utilisaient d'ailleurs des informations provenant de données de télédétection : ayant pour la plupart eu lieu à la suite de mes travaux en télédétection on peut donc associer cet ensemble à une évolution de mon positionnement. Le premier de ces travaux concerne l'effet d'un changement environnemental sur l'agriculture tandis que les deux seconds interrogent la relation inverse.

1. La modélisation de l'impact du changement climatique sur la croissance de cultures à l'échelle régionale

L'impact du changement climatique sur l'agriculture fait depuis longtemps l'objet de tentatives de modélisation, couplant des modèles de cultures et des techniques de spatialisation. Mais ces tentatives ciblaient principalement des échelles très petites (une résolution de 1° à 3° géographiques), tant pour l'appréciation globale qu'elles apportent que pour la justesse des projections (Easterling et al., 1998). Or, comprendre l'impact du climat au niveau d'un territoire ou de l'exploitation – plus directement utile à l'action – requiert des projections à une échelle bien plus grande. Et en augmentant l'échelle l'importance de la variabilité du sol s'accroît par rapport à celle de la variabilité du climat. Pour éclairer ce rapport à l'échelle régionale j'ai mené une étude dans le cadre du projet européen IMPEL (quatrième programme cadre de la Commission Européenne) visant à apprécier l'impact du

changement climatique sur le blé dur dans la petite région naturelle des vallées de l'Hérault, du Libron et de l'Orb (1200 km²), avec un gradient climatique marqué entre la méditerranée et le piémont du Massif Central (avec une pluviométrie plus importante au nord). L'information fournie par une centaine de profils pédologiques, sélectionnés pour représenter la variabilité pédologique de la région, et couplé à l'information climatique des endroits correspondant à ces profils, ont permis de réaliser des simulations avec le modèle de culture EuroACCESS, combinant un modèle de croissance et un modèle de bilan hydrique du sol (une combinaison des modèles EPIC-PHASE, ARCWHEAT et CORNGRO).

Remarquez que, comme indiqué dans la section précédente, une telle modélisation régionale de cultures, s'il s'était agi de cultures réellement cultivées au lieu d'un cas théorique, aurait fort bien pu être renseignée à plusieurs niveaux par des informations obtenues par télédétection (évapotranspiration, LAI, ...). Mais ici il s'agissait de cartographier le rendement théorique du blé dur, ce qui passe par l'établissement de courbes de réponse, en occurrence la réponse à la réserve utile du sol (RU) par type de climat. Les scénarios de climats futurs étaient fournis par l'outil EUROSCEN, sélectionnant trois modèles de circulation générale (GISS, HadCM2 et UKHI, variant respectivement de changements climatiques faibles à forts). Par type de climat au sein de cette région la relation entre la RU et le rendement, mais aussi le *changement* de rendement induit par le changement climatique, apparaissent comme forts : le rendement connaîtrait une baisse nettement plus forte sur des sols à forte RU que là où cette RU constitue déjà une contrainte majeure. Et le climat du nord de la région d'étude connaîtrait la diminution de pluviométrie la plus notable. En cas de changement climatique fort, la RU se révèle discriminante pour estimer le changement de rendement dans toute la région. En cas de changement climatique moyen elle l'est dans la partie nord de cette région.

En caractérisant chaque unité cartographique de sol par une RU, la carte pédologique de la région permettait à cette étude de proposer une cartographie de l'impact du changement climatique sur le rendement du blé dur (A-22). Nous avons ensuite amélioré cette spatialisation en affectant à chaque unité non pas une RU unique, mais une distribution floue obtenue en solutionnant un système de contraintes autour d'une fonction de pédotransfert basée sur des variables floues de texture du sol (A-21, Pr-9, R-12). Cela a permis au résultat final de mieux répondre à des questions communes d'utilisateurs pressentis d'une telle cartographie, comme par exemple « Est-ce que le rendement prédit est inférieur ou supérieur à une valeur seuil Z donné ? » où Z peut par exemple correspondre au seuil de rentabilité.

2. La modélisation et la projection de changements d'occupation du sol dans les Néotropiques

Les changements d'utilisation du sol – s'exprimant pour grande partie dans des changements d'occupation du sol – constituent une des principales voies par lesquelles les dynamiques du secteur agricole, plus grand utilisateur de terres au monde, affecte l'environnement. La voie la plus emblématique et probablement la plus significative est celle de la déforestation au profit de l'agriculture en région tropicale. Informer de manière la plus adéquate possible sur cette conversion politiquement hautement sensible est crucial, comme l'illustre les discussions de ces dernières années autour du palmier à huile, du soja, du biocarburant, etc. Où « informer de manière adéquate » ne

signifie pas seulement une information considérée suffisamment fiable et spatialement détaillée, mais aussi une information ne portant pas que sur le passé, mais aussi et surtout sur le futur proche.

La déforestation dans les Néotropiques, dont l'Amazonie, concentre depuis longtemps une forte attention. De nombreuses études locales ont bien démontré la complexité des processus sous-jacents à ce phénomène, sa variabilité au travers de cette grande région, tout comme les grands traits caractéristiques communs. Mais l'ensemble de ce capital de connaissance-là ne permettait pas de s'exprimer sur la part de cette déforestation – et sa localisation – pouvant principalement être « attribuée » à tel ou tel secteur. Dans un contexte où en général et de manière qualitative voire subjective ce changement était attribué à l'expansion de l'élevage il importait de mieux informer une telle relation pour des décideurs politiques à divers niveaux, dont un niveau territorial relativement local, nécessitant une information à la fois homogène – en termes de données, de méthode et d'hypothèses mobilisées – et spatialement détaillée, portant sur un horizon temporel de l'ordre d'une décennie. Mais au-delà elle se destine aussi au grand public dans un contexte mondial de changements climatiques préoccupants et d'une consommation alimentaire se voulant plus responsable.

Une telle ambition se heurte à de multiples contraintes, comme par exemple l'absence à cette échelle d'une information historique sur les changements d'utilisation du sol, souvent requise par les modèles de simulation comme base d'apprentissage. J'ai contourné ce problème-là en mobilisant un outil établi au sein de la communauté de recherche en changement d'utilisation du sol et conçu pour établir des relations statistiques – par régression logistique – entre utilisation du sol et facteurs explicatifs pour une seule date/période : CLUE-s (Verburg et al., 2002). Ce modèle, représentant l'état de l'art dans cette communauté au moment de l'étude (Verburg et al., 2004), simule de manière dynamique la compétition entre plusieurs types d'utilisation du sol sur la base de leurs « préférences » spatiales, locales, respectives en allouant ainsi géographiquement un volume de changement au niveau national prédéfini – par des experts locaux lors d'ateliers régionaux (A-13). Il s'agissait d'une version du modèle CLUE où les régressions déterminant les modèles de localisation par type d'utilisation ainsi que leurs « forces » compétitives pouvaient être définies au niveau sous-national. À l'aide d'une cartographie de systèmes agricoles, j'ai ainsi établi des jeux de modèles pour 33 régions ou pays au sein d'une zone allant du Guatemala au Paraguay. Une carte d'utilisation du sol à une résolution de 1 km² était obtenue pour l'ensemble de la zone à partir de deux cartes régionales d'occupation du sol dérivées de données télédétektées en l'an 2000. Un important effort était ensuite dédié à la cartographie à une échelle compatible de l'ensemble des « facteurs de localisation » pouvant jouer un rôle selon le corpus respectif. Il en ressort quelques originalités, comme par exemple des facteurs de localisation dont l'estimation locale dépend de l'utilisation du sol environnante (e.g. fragmentation du paysage, accès au réseau routier et au marché), imposant une boucle de rétroaction au cours de la simulation pour prendre en compte l'effet des changements simulés sur les surfaces de probabilité calculées à l'aide de modèles de régression faisant intervenir tels facteurs.

La carte de la Figure II.8 illustre, pour la partie d'Amérique du Sud de la zone d'étude, les résultats obtenus par les simulations effectuées par pays considérant l'ensemble des jeux de modèles des zones à l'intérieur de ceux-ci et des cartes d'utilisation du sol et de facteurs de localisation définis à une résolution de 3 km². Elle dépeint des « zones » de changement concentré (hot spots) et diffus, la localisation exacte des pixels du résultat brut de simulation ne représentant nullement une information fiable. L'agrégation de ces résultats suggère qu'en Amérique Centrale de l'ordre de 69% de l'aire déboisée serait substitué par du pâturage, cette proportion s'élevant à 62% pour la partie

tropicale de l'Amérique du Sud. Au niveau national cette proportion varierait de l'ordre de 88% au Venezuela et en Guyane à 47-54% en Bolivie et Pérou.

Ces résultats, qui à l'époque de leur obtention concernaient une situation distante de sept ans dans le futur, ont depuis fait l'objet d'une tentative de validation par d'autres auteurs : en comparant nos résultats avec une cartographie basée sur des données télédéetectées en 2010, l'année cible de nos



Figure II.8 Predicted 2000–2010 South American deforestation hot spots and diffuse deforestation areas (A-13).

simulations, et en acceptant une « imprécision maximale de localisation » des résultats bruts de simulation de l'ordre de 150 km, Rosa et al. (2014) ont conclu que 80% de nos projections se sont révélées justes. Si elles se montrent assez justes, elles se montrent aussi utiles comme en témoigne la littérature qui cherche à faire avancer les débats autour de la durabilité des évolutions au sein du secteur de l'élevage (Herrero et al., 2009; Rivera-Ferre et al., 2016).

3. L'estimation du rôle du secteur de l'élevage dans les changements environnementaux

Le remplacement *in fine* de forêt tropicale par la prairie pâturée, derrière le fameux « front pionnier », constituait la relation la plus emblématique et directe entre élevage et environnement. Mais les projections de la section précédente contribuaient à une prise de conscience progressive de l'importance et de la complexité que revêtent les relations plus indirectes : que ce soit en Bolivie, au Brésil ou au Paraguay, la forte déforestation au profit de terres cultivées concernait quasi exclusivement la culture du soja, cultivé au moins autant pour ses débouchés en alimentation animale qu'humaine. Cela pose la question de la « responsabilité » de la production de ruminants ailleurs au monde, notamment laitiers, tout comme celle du « partage de responsabilités » entre les secteurs des ruminants et des monogastriques, ou encore entre élevages dits « extensifs » et « intensifs ».

C'est cette prise de conscience qui a induit en ces premières années 2000 une vague d'études ascendantes pour dresser le bilan des « impacts environnementaux » induits par tel ou tel produit animal en remontant la chaîne de sa production, traduite par la montée en puissance des analyses de cycle de vie (ACV) en agriculture. Mais orienter l'attention des décideurs, à l'échelle du globe, pour accompagner et encadrer au mieux les fortes évolutions en cours dans ce large secteur de l'élevage nécessitait d'y joindre une approche descendante quantifiant et cartographiant au mieux les principaux impacts environnementaux produits par l'ensemble des activités agricoles dédiées à la fourniture de produits animaux.

a) Révéler les transitions au sein du secteur de l'élevage

Au vu de la croissance rapide du secteur, une telle ambition se heurtait tout d'abord à l'actualisation insuffisante des données. J'ai ainsi encadré une étude permettant d'actualiser les estimations des populations d'animaux à travers le monde pour l'ensemble de systèmes de production, s'appuyant sur la classification de Seré and Steinfeld (1996) (R-10, Figure II.9). Puis nous avons caractérisé les dynamiques de ces systèmes et analysé les forces qui les induisent (A-15). Ces dynamiques systémiques sont de divers ordres : intensification, concentration spatiale, intégration verticale, croissance de la taille des exploitations et expansion des systèmes. J'ai pu démontrer la dynamique de concentration spatiale des principaux secteurs de monogastriques dans les pays émergents que sont le Brésil et la Thaïlande en m'appuyant sur des données spatialement désagrégées des services statistiques nationaux (O-8). Ainsi, la Figure II.11 montre la concentration des élevages de volaille et de porc à la périphérie de Bangkok en 2001, des productions jusqu'à peu auparavant encore étroitement corrélées à la densité de la population humaine. Et la production d'aliment de bétail se situe d'autant plus éloignée de la ville que sa valeur pondérale est plus forte. Avec les travaux de mes collègues sur les « puits de nutriments » que constituent les villes chinoises, grandes productrices (et consommatrices) porcines (Gerber et al., 2005), ce sont là des dynamiques qui sont à l'origine de mon orientation ultérieure vers la gestion territoriale des résidus organiques (II.D.1).

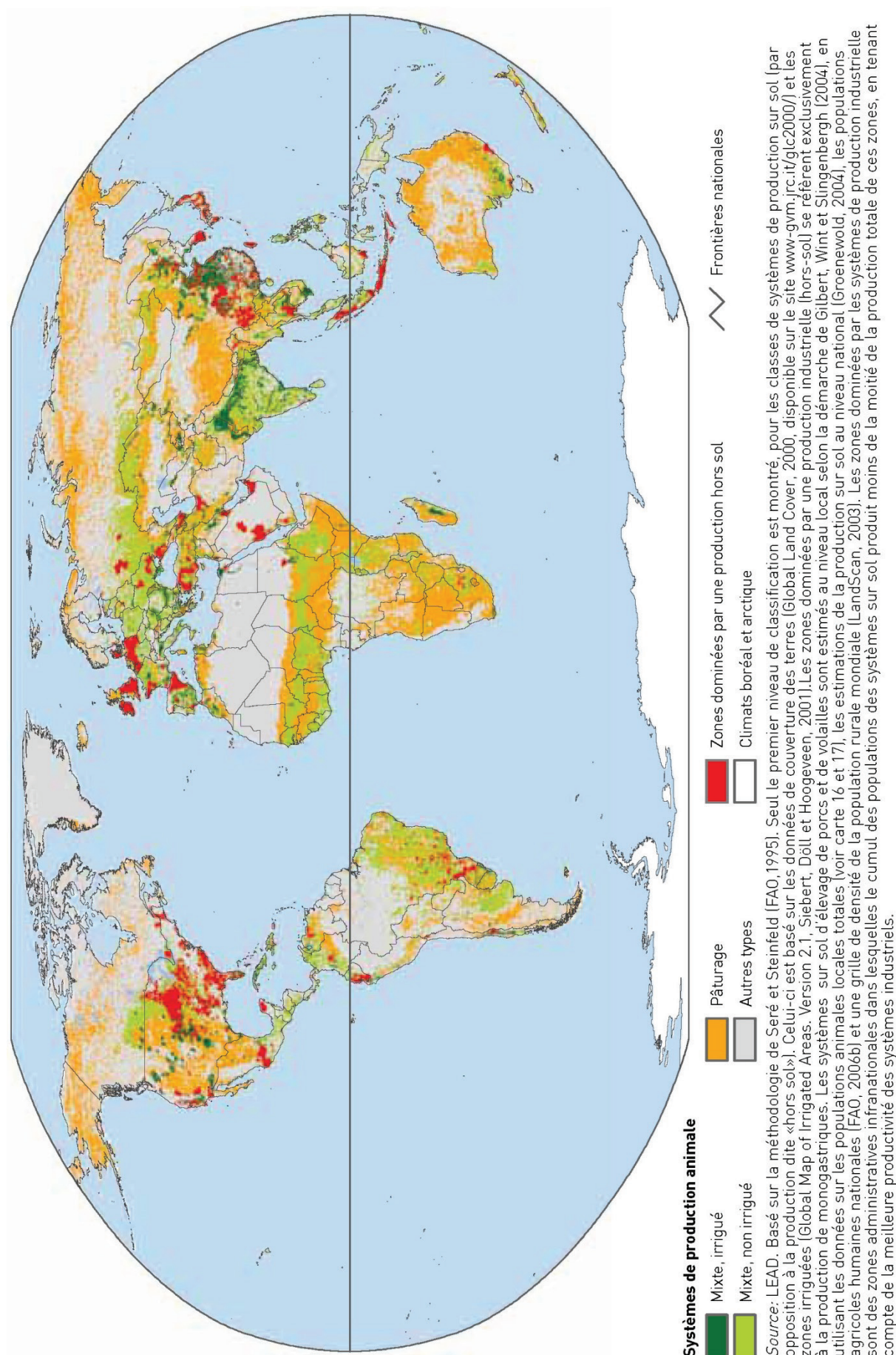


Figure II.9 Estimation de la distribution des systèmes de production animale (O-9)

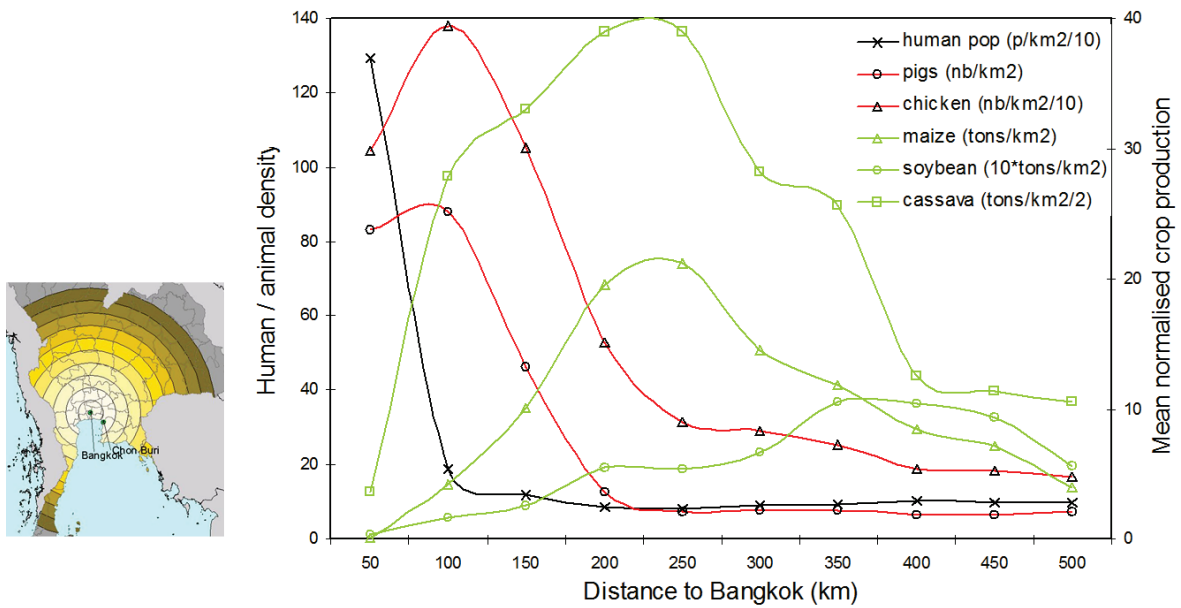


Figure II.11 Densités d'humains, de porcins et de volaille de chair et production des principales cultures fourragères par cercle concentrique autour de Bangkok. Basé sur des données relevées en 2001 (O-8).

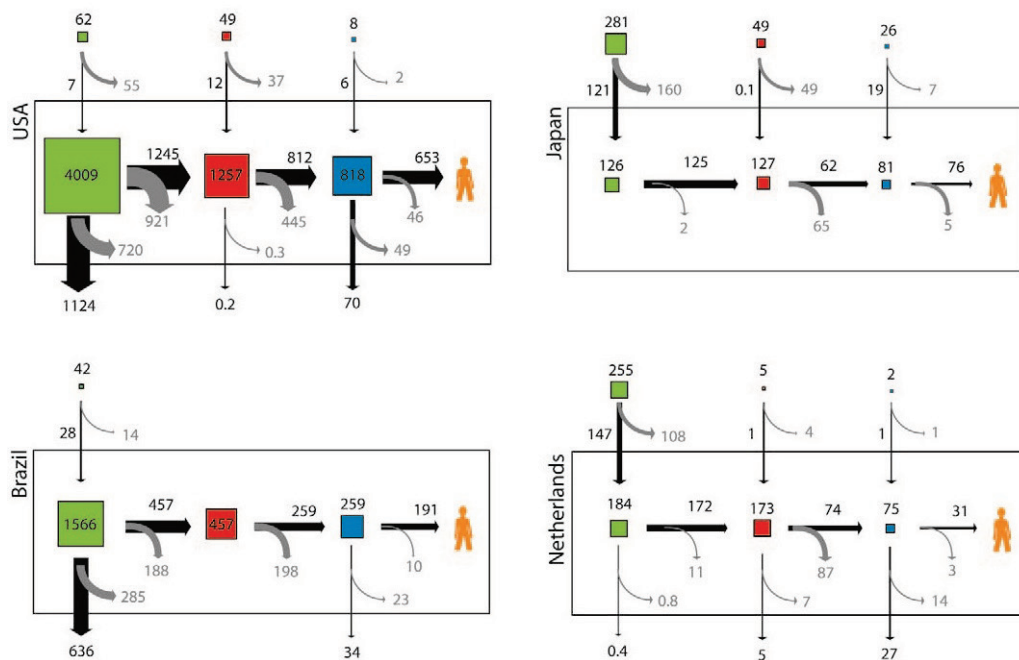


Figure II.11 Losses and flows of nitrogen associated with import (entering the “country-box” at the top), export (leaving the “country-box” at the bottom) of chicken meat, pig meat, and related feed. The boxes within the country-box represent both domestic production and the embedded N that comes in through imports—as such, they represent the total amount of N involved in different stages of animal production; green = feed, red = live animal, blue = processing. Black arrows represent embedded N in both domestically consumed and traded product. Gray, curved arrows represent virtual nitrogen. Values are annual totals in thousand metric tons, averaged over the years 2000–2002 (A-12).

Ces bases de données ont induit d'autres études portant sur divers aspects de ces dynamiques, comme par exemple la globalisation qu'induit l'intégration verticale dans la production de monogastriques. Nous avons ainsi quantifié à quel point certains pays importateurs de viande profitent d'un commerce « virtuel » de ressources comme des terres, de l'eau ou de l'azote, fournies par des pays producteurs d'aliments de bétail ou de viande sans tenir compte du coût environnemental que représente ces ressources virtuellement comprises dans ces produits (A-12, Figure II.11). L'importation de viande de poulet et de porc au Japon représente par exemple un équivalent en terre cultivée correspondant à la moitié de la surface agricole utile de ce pays, tandis que la moitié de l'azote utilisé pour aboutir à cette production a été perdue aux États-Unis. Ce sont ces observations qui sont à l'origine d'une argumentation en faveur de mesures permettant le « re-couplage » de l'élevage à sa base matérielle de production (Naylor et al., 2005).

Une synthèse des dynamiques à l'œuvre dans ce secteur de l'élevage est présentée dans l'ouvrage *Livestock's Long Shadow* (O-12). Ces analyses ont été ultérieurement affinées par un consortium scientifique global (Steinfeld et al., 2010). L'inventaire spatialisé des systèmes de production animale a lui aussi été actualisé et affiné ultérieurement (Robinson et al., 2011) ce qui constituait un préalable à des analyses détaillées de type ACV (Gerber et al., 2011, 2013) donnant suite à nos travaux portant sur l'évaluation globale.

b) Le rôle du secteur de l'élevage dans les changements environnementaux globaux

L'impact environnemental d'un secteur d'activité qui dans son ensemble – pâturages et terres cultivées – « occupe » de l'ordre de 30% des terres émergées non couvertes de glace de notre planète et qui par ailleurs est soumis à de fortes dynamiques est nécessairement énorme. Dans l'ouvrage cité ci-avant (O-12) nous avons abordé ces impacts selon quatre catégories relativement indépendantes, considérés à l'époque comme constituant les principaux domaines d'impact de l'élevage et classés depuis parmi les « limites planétaires » (Rockström et al., 2009) : l'impact sur la ressource en eau douce, la dégradation des terres et de la biodiversité et la contribution au changement climatique. La dégradation des terres y est abordée selon les composantes suivantes : l'expansion aux dépens d'écosystèmes naturels (où l'on retrouve la déforestation), la dégradation de pâturages, la contamination au sein d'environnements péri-urbains, la perte de fertilité des sols cultivés. Mais j'ai quant à moi coordonné et pour bonne partie réalisé les évaluations – aussi quantitatives que possibles – dans les trois autres domaines d'impact. Nous y observons que ces problèmes environnementaux constituent *in fine* des problèmes sociaux : les coûts générés par certains sont assumés par d'autres, ou par tous ; le bon état de l'environnement et des ressources affectent le bien-être des générations futures ; la dégradation de ces ressources est source de conflits ; puis diverses formes de dégradation peuvent constituer, directement ou indirectement, un risque pour la santé humaine. Cette observation résonne avec mes travaux plus récents (II.D.2) qui m'ont amené à considérer comme des externalités matérielles ce dont « impact environnemental » est le nom vernaculaire (III).

L'estimation de la contribution du secteur de l'élevage au changement climatique est la partie de l'évaluation ayant rencontré de loin le plus fort écho, tant sur les plans scientifique que médiatique. D'une part parce qu'il s'agit du domaine constituant la plus forte préoccupation sociétale, jusque-là principalement associé à l'activité industrielle, et d'autre part du fait de sa quantification relativement détaillée, mais débouchant sur un chiffre unique résumant cet impact : une contribution aux émissions de gaz à effet de serre d'origine anthropique de l'ordre de 18%. Cette quantification a été possible

grâce à l'important ensemble de données dont nous disposons, d'une part, et que nous avons pu recueillir par divers moyens, réseaux et études d'autre part. Mais pour orienter l'action, plus important que ce chiffre global est de décrire les sources qui le composent (Tableau II-1) et où elles se situent, en termes de type de système et de lieu (comme l'illustre la carte de la Figure II.12 pour le méthane).

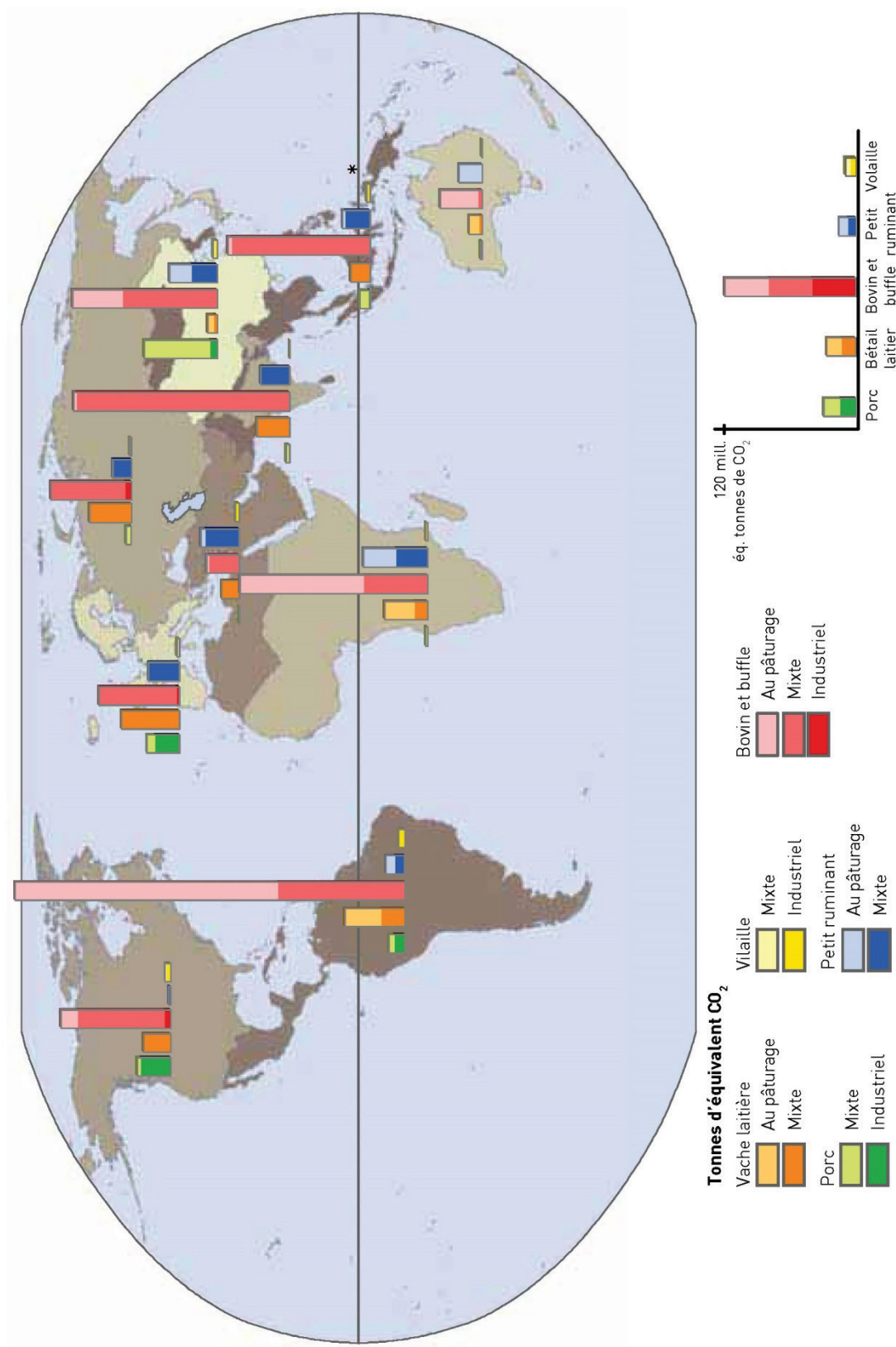
Gaz	Source	Surtout liées aux systèmes extensifs (10 ⁹ tonnes d'éq. CO ₂)	Surtout liées aux systèmes intensifs (10 ⁹ tonnes d'éq. CO ₂)	Contribution aux émissions de GES liées à l'alimentation animale (pourcentage)
CO₂	Volume total d'émissions anthropiques de CO₂	24 (~31)		
	Volume total lié aux activités de l'élevage	~0,16 (~2,7)		
	production d'engrais azoté		0,04	0,6
	carburants fossiles sur l'exploitation, aliments du bétail		~0,06	0,8
	carburants fossiles sur l'exploitation, en rapport avec l'élevage		~0,03	0,4
	déforestation	(~1,7)	(~0,7)	34
	sols cultivés, labour		(~0,02)	0,3
	sols cultivés, chaulage		(~0,01)	0,1
	désertification des pâturages	(~0,1)		1,4
	transformation		0,01 – 0,05	0,4
	transport		~0,001	
CH₄	Volume total d'émissions anthropiques de CH₄	5,9		
	Volume total lié aux activités de l'élevage	2,2		
	fermentation entérique	1,6	0,20	25
	gestion des effluents d'élevage	0,17	0,20	5,2
N₂O	Volume total d'émissions anthropiques de N₂O	3,4		
	Volume total lié aux activités de l'élevage	2,2		
	application d'engrais azoté		~0,1	1,4
	émissions indirectes des engrais		~0,1	1,4
	cultures de légumineuses fourragères		~0,2	2,8
	gestion des effluents d'élevage	0,24	0,09	4,6
	épandage/dépôt des effluents	0,67	0,17	12
	émission indirecte d'effluents	~0,48	~0,14	8,7
Total général des émissions anthropiques		33 (~40)		
Volume total des émissions liées aux activités de l'élevage		~4,6 (~7,1)		
Rapport total entre les émissions issues des systèmes intensifs et extensifs		3,2 (~5,0)	1,4 (~2,1)	
Pourcentage du volume total d'émissions anthropiques		10 (~13%)	4 (~5%)	

Note: Toutes les valeurs sont exprimées en milliards de tonnes d'équivalent CO₂; les valeurs entre parenthèses représentent ou font partie des émissions liées à l'utilisation des terres, au changement de leur affectation ou à la foresterie; les estimations relativement peu précises sont précédées d'un tilde.

Source des sommes mondiales: CAIT, WRI, consultés en 02/06. De tous les gaz à effet de serre, seules les émissions de CO₂, CH₄ et N₂O ont été considérés.

Les émissions dues à l'élevage sont analysées dans ce chapitre en les attribuant, d'où qu'elles proviennent, aux composantes de tous les systèmes de production (depuis l'extensif jusqu'à l'intensif/industriel).

Tableau II-1 Rôle de l'élevage dans les émissions de dioxyde de carbone, de méthane et d'oxyde nitreux (O-9).



Source: LEAD. Basé sur les estimations des populations dans les régions et les systèmes de production spécifiques (Groenewold, 2005) et sur les facteurs d'émission (voir Chapitre 3, encadré 3.4 et annexes 3.1 et 3.2).
* Asie du Sud et de l'Est, excepté la Chine et l'Inde.

Figure II.12 Emissions totales de méthane issues de la fermentation entérique et des effluents, par espèce et principaux systèmes de production (O-9).

Derrière chaque ligne du Tableau II-1 se « cache » une étude plus ou moins poussée. La valeur de ce travail ne résidait pas seulement dans son exhaustivité unique, mais aussi dans le niveau d'actualisation de ses parts. Nous avons ainsi pu démontrer que certains travaux, récents à l'époque, portant sur une composante de cet ensemble, sous-estimaient cette composante du fait des données considérées, non pas très anciennes, mais dépassées. Concernant les rejets directs d'azote par exemple, nous estimions qu'un total mondial de 125 millions de tonnes d'azote était excrété chaque année, alors que des publications récentes (Galloway et al., 2003) faisaient encore état de 75 millions de tonnes par an, à partir de données datant du milieu des années 90. De manière similaire nous avons pu estimer des facteurs d'émission pour la fermentation entérique et les émissions et volatilisations issues des effluents, par région mondiale et suivant la méthode de niveau 2 du Groupement Internationale pour l'Etude du Climat (GIEC). Ceux-ci se révélaient, pour plusieurs régions, sensiblement différents des facteurs standards (niveau 1) proposés par le GIEC, basés quant à eux sur des données datant pour partie de 20 ans auparavant (annexe 3 dans O-9, O-10).

Nous avons par la suite repris ces résultats pour éclairer le débat sous un angle quelque peu différent, en suivant la dichotomie tendant à opposer les systèmes dits intensif ou industriel et ceux dits extensif. Dans A-14 nous décrivons par quel processus et à quel point chacun de ces ensembles « interviennent » dans les cycles globaux de l'azote et du carbone. Bien que de nature très différente, ces deux ensembles d'intervention sont très importants et ne se prêtent guère à une comparaison simpliste. Tout en soulignant les manquements de la connaissance disponible pour que de tels exercices de quantification puissent être justes et fiables, nous nous sommes dans tous ces travaux toujours efforcés d'analyser les options techniques et politiques pertinentes pour réduire les impacts les plus importants.

Tel était aussi le cas dans les études portant sur l'impact sur la ressource en eau et sur la biodiversité. Concernant l'utilisation de l'eau, la part de l'eau douce utilisée (le terme *consommer* est plus ambiguë en matière d'eau, car l'utilisation ne la rend pas nécessairement indisponible pour l'utilisation ultérieure) par l'élevage même – pour l'abreuvement et l'entretien – n'est que de l'ordre de 0,6% de l'eau utilisée dans le monde, bien que localement nettement supérieur. Elle s'élève par exemple à 23% dans un pays aride comme le Botswana où le nombre excessif de forages menace la production animale elle-même à court terme. Mais au niveau global l'utilisation de l'eau pour la production de l'aliment de bétail domine l'utilisation par ce secteur : sans considérer les fourrages et prairies pluviales, la culture irriguée d'aliments du bétail représente 7% sur un total de 7,7% de l'utilisation mondiale.

C'est un des résultats d'une étude que j'ai pu mener pour quantifier l'utilisation des ressources en eau par ce secteur et évaluer sa portée. Cette évaluation s'appuyait sur la spatialisation des bilans hydriques et sur les informations disponibles pour les quatre cultures fourragères les plus importantes : orge, maïs, blé et soja (ci-après dénommées OMBS). Ces quatre cultures représentent environ les trois quarts de l'ensemble des fourrages utilisés pour l'élevage intensif des monogastriques. La part d'utilisation de ces quatre céréales est du même ordre de grandeur pour les autres principaux secteurs consommateurs de fourrages OMBS, comme celui de la production laitière intensive. Deux approches différentes ont été conçues pour prendre en compte, dans l'estimation de l'utilisation d'eau par les cultures fourragères, certaines approximations liées à l'absence de données suffisantes quant à la localisation de ces dernières (annexe 3.4 dans O-9, O-10). Comme le montre le Tableau II-2, ces deux méthodes donnent des résultats très similaires. Ceci suggère que, malgré un

certain nombre d'hypothèses non vérifiées, les quantités globales obtenues grâce à ces calculs peuvent fournir des estimations relativement justes.

Région/Pays	Fourrages OMBS irrigués			Fourrages OMBS non irrigués		Pourcentage du volume d'eau d'irrigation perdu par évapotranspiration dans les cultures d'OMBS par rapport au pourcentage volume d'eau total perdu par évapotranspiration dans ces mêmes cultures
	Volume d'eau d'irrigation perdu par évapotranspiration km ³	Pourcentage du volume total d'eau d'irrigation perdu par évapotranspiration	Pourcentage du volume total d'eau perdu par évapotranspiration dans les zones irriguées ¹	Volume d'eau perdu par évapotranspiration km ³	Pourcentage du volume total d'eau perdu par évapotranspiration dans les cultures non irriguées	
Amérique du Nord	14,1 – 20,0	9 – 13	11 – 15	321 – 336	21 – 22	4 – 6
Amérique latine et Caraïbes	3,0 – 3,8	6 – 8	7 – 9	220 – 282	12 – 15	1
Europe de l'Ouest	8,5 – 9,5	25 – 28	25 – 29	65 – 99	14 – 22	7 – 10
Europe de l'Est	1,8 – 2,4	17 – 22	19 – 23	30 – 46	12 – 18	4 – 5
Communauté des Etats indépendants	2,3 – 6,0	3 – 7	3 – 7	19 – 77	2 – 8	7 – 9
Asie de l'Ouest et Afrique du Nord	11,2 – 13,1	9 – 10	13 – 14	30 – 36	9 – 11	17 – 19
Afrique subsaharienne	0,2	1	1	20 – 27	1 – 2	1
Asie du Sud	9,1 – 11,7	2 – 3	2 – 3	36 – 39	3	16 – 18
Asie de l'Est et du Sud-Est	20,3 – 30,1	14 – 20	13 – 18	226 – 332	11 – 16	6 – 7
Océanie	0,3 – 0,6	3 – 5	3 – 5	1,7 – 12	1 – 4	5 – 12
Australie	0,3 – 0,6	3 – 5	4 – 6	1,4 – 11	1 – 5	5 – 14
Chine	15,3 – 19,3	14 – 18	15 – 16	141 – 166	14 – 16	7 – 8
Inde	7,3 – 10,0	3	2 – 3	30 – 36	3	17 – 18
Brésil	0,2 – 0,4	6 – 10	9 – 14	123 – 148	14 – 16	0
Monde	81 – 87	8 – 9	10	1 103 – 1 150	10 – 11	6

Note: Les chiffres en caractères gras proviennent de la méthode de la concentration spatiale. Les autres chiffres se basent sur la méthode d'intégration régionale (voir Annexe 3.4 pour les détails et la méthodologie). Les valeurs sont toutes des estimations de l'évapotranspiration (ET) réelle obtenues à partir de données sur l'irrigation totale et l'ET naturelle fournies par J. Hoogeveen, FAO (estimées selon la méthodologie décrite dans FAO, 2003a).

¹ L'évapotranspiration issue des zones irriguées est la somme de l'évapotranspiration issue de l'eau d'irrigation et de l'évapotranspiration issue des précipitations dans les zones irriguées.

Source: Calculs personnels.

Tableau II-2 Evapotranspiration des ressources en eau pour la production d'orge, de maïs, de blé et de soja (OMBS) destinée à l'alimentation du bétail (O-9).

A l'échelle planétaire, la culture des fourrages OMBS est responsable de l'évapotranspiration d'environ 9 pour cent du volume total d'eau d'irrigation perdue par évapotranspiration dans le monde. Si l'on inclut l'évapotranspiration de l'eau des précipitations dans les zones irriguées, cette part atteint environ 10 pour cent du volume total d'eau perdu par évapotranspiration dans les zones irriguées. Etant donné que les fourrages OMBS non transformés ne représentent que trois quarts des aliments distribués en élevage intensif, près de 15 pour cent du volume d'eau perdu par évapotranspiration dans les zones irriguées – donc de la *consommation* constituant un réel appauvrissement – peuvent probablement être attribués au secteur de l'élevage. Il existe des différences régionales marquées. En Europe, la culture des fourrages OMBS est de préférence irriguée. De même, dans les régions arides comme en Asie de l'Ouest et en Afrique du Nord, la part de l'évapotranspiration causée par la culture des fourrages OMBS en zone irriguée dépasse celle des surfaces agricoles non irriguées. Il est clair que

la production des aliments pour le bétail consomme de grandes quantités de ressources en eau essentielles et se trouve ainsi en compétition avec d'autres usages et utilisateurs.

Déjà bien délicate pour la ressource en eau à cause du large éventail de types et de sources de pollution contribuant à la *consommation*, la quantification de l'impact du secteur sur la biodiversité est simplement impossible. D'abord parce que la biodiversité n'est elle-même pas quantifiée. Puis parce que les pertes se font à trois niveaux distincts, mais corrélés : les niveaux génétique, spécifique et écosystémique. Ces pertes ont aussi lieu à diverses échelles de temps, et elles résultent de l'interaction inextricable de nombreux changements environnementaux auxquels l'élevage contribue pour partie et partiellement. Les principaux facteurs à l'origine de la perte de biodiversité et des modifications des services écologiques sont toutefois relativement bien identifiés : l'altération des habitats, le changement climatique, les espèces exotiques envahissantes, la surexploitation et la pollution. Ces causes ne sont pas indépendantes. Ainsi, l'impact sur la biodiversité du changement climatique et une grande part de celui de la pollution sont indirects, passant à travers l'altération des habitats, tandis

Mécanisme de la perte de biodiversité induite par l'élevage	Type de système d'élevage		Niveau de biodiversité affecté		
	Elevage extensif	Elevage intensif	Intra-espèces	Inter-espèces	Ecosystème
Fragmentation forestière	↗	↑	●	●	●
Intensification de l'utilisation des terres	↗	↑		●	
Désertification	→			●	
Transition forestière (reconversion d'anciens pâturages)	↗			●	●
Changement climatique	↗	↑	●	●	●
Invasions par le bétail	↘			●	
Invasions végétales	↘	→		●	●
Rivalité avec la faune et la flore sauvages	↘	↑		●	
Surpêche		↗	●		
Erosion de la diversité du bétail		↑	●		
Toxicité		↑	●		
Pollution de l'habitat	→	↑		●	●

Légende: Niveau relatif et type de menace pour la biodiversité résultant des différents mécanismes. Les adjectifs «extensif» et «intensif» se rapportent à l'importance des contributions des deux extrêmes du continuum des systèmes de production animale. L'ombre rouge indique le niveau de l'impact par le passé.

■ très fort

■ fort

■ modéré

■ faible

blanc: pas d'effet

Les flèches indiquent la direction des tendances actuelles

↘ décroissante

→ stable

↗ croissante

↑ en croissance rapide

Tableau II-3 Classement expert des menaces sur la biodiversité liées à l'élevage et résultant de différents mécanismes et divers types de systèmes d'élevage (O-9).

que cette altération va souvent de pair avec l'introduction d'espèces envahissantes. Une étude de littérature m'a permis de documenter et de qualifier la contribution du secteur de l'élevage et ses dynamiques – pour partie historiques – à ces facteurs de perte de biodiversité. Nous avons ainsi tenté de présenter un éventail complet des impacts les plus importants et répandus de l'élevage sur la biodiversité (Tableau II-3). Mais si la qualification produite est utile en tant que première indication, force est de constater que ce travail-là ne peut prétendre au titre de « évaluation d'impact » : à l'heure actuelle la question fait encore largement l'objet de débats au sein de la communauté de l'ACV, où il ne s'agit « que » de la considération d'un seul produit à la fois. De là à agréger de telles estimations pour l'ensemble des productions animales partout au monde, le chemin est encore long.

c) *La contribution de l'élevage aux émissions de GES de l'Union Européenne*

La publication des travaux de la section précédente a entraîné des questions du Parlement européen à la Commission européenne. Clarifier le cas du secteur de l'élevage européen sur le plan climatique – le souhait résultant de la direction générale de l'Agriculture de la Commission – s'est révélé constituer un travail plus ardu que ne l'était déjà le travail au niveau mondial. Les principaux inconnus et incertitudes sont les mêmes, mais s'y ajoutent d'autres, liés au passage de la considération d'un tout à celle d'un sous-ensemble. C'est la même question à laquelle je me trouve encore confronté aujourd'hui dans mes travaux territoriaux et qui mérite une réponse formelle générale ainsi qu'une réponse spécifique et explicite dans chaque situation : où situer la limite de ce sous-ensemble constituant un « système », et quelles sont les relations de ce système avec le tout ? Pour le cas en question cela paraît assez évident à première vue. Mais dès que l'on cherche à définir et délimiter ce qu'est « l'élevage européen » on se trouve devant des choix : doit-on comptabiliser les animaux importés « sur pied » dans l'UE ? Et la production de l'UE destinée à l'export ? Et dès que l'on isole une partie, la nécessité d'explicitation sa relation à l'ensemble s'impose : quel part de cultures consommées par ce bétail « européen » proviendrait de soles situées à l'extérieur, et quel impact y produit est donc à mettre sur son compte ? Puis, comment quantifier la situation au sein de ce système de manière plus fiable et détaillée qu'au niveau globale si celle-ci se caractérise par son ouverture et ses dynamiques spatiales internes ?

Tous ces points ont été résolus ou, à défaut, tranchés. Le *Common Agricultural Policy Regionalised Impact Modelling System* (CAPRI⁵), un modèle agro-économique open source développé sous GAMS pour et en partie par la Commission Européenne, constituait le cœur de cette étude. Ce choix permettait de produire des estimations au niveau régional (NUTS 2), cohérentes et comparables entre ces unités. Avec les avantages de fournir : une base de données consolidées des activités agricoles à ce niveau NUTS 2 (CAPRI-Dynaspat) ; certains modules d'estimation de GES, dont notamment un couplage avec un modèle de simulation de la biogéochimie du carbone et de l'azote dans les agrosystèmes (CAPRI-DNDC) ; la possibilité d'explorer l'évolution des émissions en fonction de scénarios d'évolution du secteur. Les systèmes de production animale ont tout d'abord dû être classifiés, à ce niveau spatial, selon une typologie spécifique aux émissions de GES, s'appuyant pour cela sur le réseau d'information comptable agricole (RICA), la base de données sur les mouvements animaux TRADE Control and Expert System (TRACES), des informations sur les terres agricoles à haute valeur naturelle et les régions défavorisées, etc. (R-8, R-7, R-4). Un travail spécifique à base d'enquêtes

⁵ <http://www.capri-model.org/dokuwiki/doku.php?id=start>

était ensuite engagé afin de renseigner cette typologie au sujet des pratiques de gestion des effluents, individuellement pour l'ensemble des Etats Membres de l'Union (R-4).

Cette analyse de cycle de vie « du berceau au portail » (de la ferme) révèle qu'au sein de l'Union quelques 60% de la surface agricole utile est dédié à la production d'aliments de bétail, correspondant à 50% de la surface cultivée. La terre « mobilisée » à l'extérieur de l'UE, dédiée à 90% à la culture du soja, équivaut à quelques 10% de la surface cultivée de l'UE (R-7). Les ensembles de processus source d'émission considérés sont (i) ceux induits par le métabolisme des animaux (fermentation entérique, déposition et gestion des effluents, émissions des sols après apport d'effluents) ; (ii) ceux induits par la production des aliments (fertilisation, labour, résidus de cultures et processus industriels amont ; (iii) ceux liés à la consommation d'énergie (lors des étapes d'élevages, de production d'aliments, de transport) ; (iv) ceux induits par les changements d'utilisation du sol « provoqués » par la production d'aliments (en excluant toutefois les prairies et les pâturages) ; (v) les différences entre les dynamiques du carbone des utilisation du sol avant et après changement. Les ensembles d'animaux d'élevage considérés sont les grands et petits ruminants, les porcins et les volailles.

Du total d'émissions de GES estimé du secteur de l'élevage européen – 661 million de tonnes

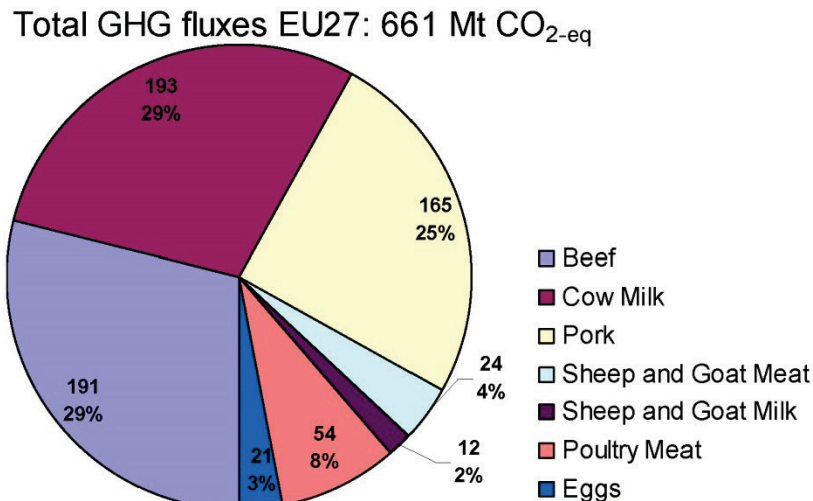


Figure II.13 Total GHG fluxes of EU-27 livestock production in 2004, calculated with a cradle-to-gate lifecycle analysis with CAPRI (R-4).

équivalents CO₂ en 2004 – la viande bovine, porcine et le lait représentent à eux trois 83% (Figure II.13). La moitié des émissions proviendrait d'activités agricoles, représentant quant à eux 85% des émissions du secteur agricole européen, et 29% de changements d'utilisation du sol, principalement en dehors de l'Europe. Les résultats confirment l'écart désormais bien connu en termes « d'efficacité climatique » entre la viande bovine et celle des monogastriques : variant entre 20 et 23 kg CO₂-eq par kilo de viande de ruminant contre respectivement 7,5 et 4,9 kg CO₂-eq par kilo de viande porcine et de poulet. Mais l'étude met en évidence d'importantes différences entre Etats Membres. En équivalent CO₂ les GES par kilo de viande bovine varient par exemple de 14,2 et 17,4 pour l'Autriche et les Pays Bas à 44,1 et 41,8 kg pour Chypre et la Lettonie (R-4).

4. Regard critique sur ce parcours en diagnostics régionaux et globaux de relations agriculture – environnement

Les relations agriculture – environnement abordées dans les travaux de cette section constituaient des sujets de préoccupation sociétale marquée. Une préoccupation que certains de ces travaux ont contribué à accroître ou à diffuser. Leur valeur scientifique ne réside pas dans la production de connaissances sur le détail des processus derrière ces relations, ni sur l'état précis de ces relations à un endroit donné. Ils apportent un aspect qui semblait manquer pour vérifier le bien-fondé de ces préoccupations : une vue plus générale – régionale ou globale, mais aussi en termes de complexité de ces relations.

Les travaux de modélisation présentés constituent le dernier maillon d'une chaîne de production de connaissances destinées non seulement à sensibiliser, mais aussi à informer des « utilisateurs ». Mais ce sont là des cibles somme tout peu ou mal définis, qui n'ont généralement pas été commanditaires des travaux. L'utilisation faite de ces résultats est de ce fait soit inconnue soit incertaine. La recherche peut elle-même compter parmi ces cibles, en s'appuyant sur ces travaux englobant de grandes étendues spatiales et/ou thématiques pour en approfondir telle ou telle composante ou situation par la suite. Du côté des utilisateurs « décideurs », il s'agirait principalement de politiques souhaitant orienter leur attention ou définir des modifications dans un cadre législatif globale et général. Du fait du lien ténu entre producteur et utilisateur d'information ce premier exerce peu ou pas de contrôle sur l'utilisation. Le mode opératoire des travaux des sections II.C.2 et II.C.3 consiste à lancer un pavé dans la mare, tout juste assorti de quelques recommandations générales comme des suggestions techniques ou des instruments de politique nationale.

Je ne remets pas en cause la pertinence et l'intérêt de ces travaux. La résonance sociétale produite et les suites données sont là pour attester de leur valeur. Mais produire des connaissances en espérant que celles-ci rencontreront d'elles-mêmes leur utilisateur est intellectuellement peu satisfaisant et objectivement insuffisant. Cela d'autant plus si ces connaissances dégagent des pistes d'action bien identifiées sans qu'elles n'atteignent ou n'informent ceux devant les conduire.

D. La modélisation prospective du recyclage territorial de résidus organiques

Les travaux présentés dans la présente section trouvent leur origine dans le constat sur lequel vient de s'achever la section précédente : « produire des connaissances en espérant que celles-ci rencontreront d'elles-mêmes leur utilisateur est intellectuellement peu satisfaisant et objectivement insuffisant. Cela d'autant plus si ces connaissances dégagent des pistes d'action bien identifiées sans qu'elles n'atteignent ou n'informent ceux devant les conduire. » S'y ajoutent deux constats qui m'ont indiqué la direction à suivre :

- que la vocation des études aux échelles régionale et globale reste celui du diagnostic. Elles ont une faible capacité à le dépasser pour inciter à l'action, et donc de contribuer directement au développement. Tandis que le niveau situé juste en dessous, l'échelle territoriale, paraît au contraire tout à fait pertinent pour cela, et cela même plus que les niveaux encore inférieurs comme celui de l'exploitation : on peut dépasser le seul levier de la politique nationale pour formuler des actions adaptées aux conditions locales, y compris l'adaptation organisationnelle que cela sous-entend souvent ;
- qu'un seul problème de « gestion de ressources » contribue fortement à plusieurs relations agriculture-environnement problématiques et que ce problème-là tend à s'accroître inexorablement, gênant fortement le développement de territoires à forts enjeux car densément peuplés : l'important potentiel de contribution à un développement durable d'une meilleure gestion des résidus organiques.

Ce constat portant sur le recyclage de résidus organiques vaut d'un point de vue générale, bien qu'il ait été traité jusqu'ici sous le seul angle des effluents d'élevage. Pour ces seuls derniers, nos travaux ont mis en évidence, et parfois quantifié, les multiples gains auxquels une valorisation des effluents pourrait donner accès : pour certaines filières d'élevage elles-mêmes, en termes de leur développement ; pour la société des lieux où s'implantent, souvent conjointement, ses principaux maillons en aval de la chaîne – grands élevages intensifs, unités d'engraissement, abattoirs ; et même pour la société humaine tout entière pour ce qui est des gains en termes de changement climatique ou d'épuisement de ressources difficilement renouvelables. Mais c'est au sein de ces sociétés où s'implantent ces maillons principaux que l'action permettant la valorisation devra être conduite (O-6). Et dans ces lieux où les problèmes induits par la gestion actuelle des résidus, et donc les gains potentiels, sont les plus forts – les zones périphériques de grands centres urbains à forte croissance ou encore les milieux insulaires à forte croissance démographique – les filières d'élevage ne sont souvent pas le seul domaine d'activité humaine qui y induit une concentration de résidus organiques. Il n'y a aucune justification pour y exclure a priori les autres domaines d'activité producteurs de résidus organiques, telles les autres activités agro-alimentaires et la consommation alimentaire, des actions à mettre en œuvre pour valoriser ces résidus. Au titre de leurs possibles complémentarités considérer l'ensemble des résidus organiques cela peut même être une condition à la réussite de cette valorisation. C'est ce qui constitue dès lors mon nouvel objet de recherche.

De cette déduction découle un autre objet nouveau : vouloir informer plus utilement ces acteurs devant conduire les actions permettant de résoudre ou éviter des problèmes induits par

l'accumulation croissante de résidus organiques menaçant le développement amène à mobiliser le concept de territoire. Et non pas le territoire simplement vu comme une délimitation administrative d'un espace géographique, ce à quoi le terme anglo-saxon *territory* renvoie encore principalement, ni le territoire uniquement pris comme un niveau ou une échelle spatiale d'étude, ni le territoire dans son interprétation écologique. Il s'agit du territoire comme une entité en soi, à saisir à partir du réseau d'acteurs qui la constituent. Telle est la conception que nous avons retenu dans notre ouvrage récent (O-1), décrit par Vanier (2009) comme résultant de l'inscription dans l'espace géographique d'un ensemble de processus sociaux, économiques, culturels et politiques, engageant la participation des systèmes d'acteurs locaux ou impliqués localement. Il s'agit là d'un objet éminemment constructiviste. Il est de ce fait vain de vouloir réduire la notion à une définition univoque.

Le souhait d'une production de connaissances contextualisées qui soient utiles aux acteurs de terrain, et intéressantes du point de vue des sciences, conduit lui aussi à s'enrichir d'une épistémologie constructiviste. Le processus de production des connaissances selon la perspective constructiviste s'inscrit dans une logique intentionnelle, un projet de changement d'une situation donnée. Pour cela, le chercheur doit délaisser la position de l'observateur neutre et détaché et s'impliquer au plus près de la vie du territoire.

Plus qu'une rupture, les travaux de cette section représentent une accélération d'une tendance déjà entamée, mais pas encore assumée⁶, par ceux de la section précédente : le paradigme du constructivisme qui s'ajoute, graduellement et d'abord inconsciemment, au positivisme sous lequel tout chercheur en « sciences de la nature » débute sa carrière. Ma remarque au sujet des mots modèles en introduction de la section précédente en est une indication⁷. Assumer ce double paradigme – la plupart du temps sans le revendiquer – m'a entraîné dans un tourbillon réflexif qui marque toute la suite de ce mémoire et dont je ne perçois pas encore la fin. Qu'importe tant qu'il s'agit d'un voyage enrichissant et productif, mais cette place cardinale justifie de fournir ici au lecteur un résumé « à toute fin utile » de la différence entre ces paradigmes (Encadré II-1). L'évolution de mon propre positionnement, déjà évoqué dans le résumé de mon parcours (I.A), occupe du coup une place significative dans la présente section, tout comme dans mon projet de recherches (III.B). Les travaux présentés ici sont le fruit de mon implication, en binôme avec un collègue chercheur sociologue, Jérôme Queste, au sein d'un territoire correspondant peu ou prou à celui de la communauté d'agglomération du Territoire de la Côte Ouest de l'île de la Réunion. Cette implication était rendue possible grâce aux travaux antérieurs et à la présence de longue date de chercheurs de mon unité de recherche Recyclage & risques. Je résumerai comment j'y ai poursuivi mes recherches en évaluation environnementale en assumant cette fois le paradigme constructiviste (II.D.2). Cela nécessite d'aborder en premier lieu les recherches

⁶ Je postulerais volontiers que c'est ce manque d'assomption en recherche « modélisante » portant sur l'évaluation environnementale – productrice d'indicateurs, comme celle dite d'analyse de cycle de vie – qui explique pour partie ses difficultés à se faire accepter, que ce soit au sein d'une communauté scientifique à dominante positiviste ou à dominante constructiviste.

⁷ Le philosophe allemand Hans Vaihinger (1852–1933), dans sa Philosophie des Als Ob (philosophie du « comme si »), défend l'idée que nous ne pouvons percevoir que des phénomènes, à partir desquels nous construisons des modèles de pensée fictionnels auxquels nous accordons une valeur de réalité. Nous nous comportons « comme si » le monde correspondait à nos modèles. Vaihinger souligne que « nous sommes habitués à considérer comme réel tout ce à quoi nous donnons un nom, sans penser que nous pouvons certes attribuer un nom au réel, mais aussi à l'irréel ». Au physicien allemand Max Planck (1858–1947) de déclarer que « la question de savoir ce qu'est une table en réalité ne présente aucun sens. Il en va de même ainsi de toutes les notions physiques. L'ensemble du monde qui nous entoure ne constitue rien d'autre que la totalité des expériences que nous en avons. Sans elles, le monde extérieur n'a aucune signification. » (source : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Constructivisme_\(épistémologie\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Constructivisme_(épistémologie)))

portant sur le cadre de cette « évaluation » et qui ont débouchés sur les scénarios de gestion constituant son objet (II.D.1). Précédé quant à elles d'un travail portant sur le positionnement collectif de notre unité face à cette ambition de contribuer à l'identification de solutions aux problèmes que posent les résidus organiques au développement de certains territoires.

Positivisme et constructivisme

L'épistémologie positiviste postule la dualité sujet/objet et préconise le raisonnement déductif et analytique basé sur les quatre préceptes : évidence, exhaustivité, réduction et causalisme. Le mot positif désignant le réel. Le positivisme postule que la connaissance que constitue progressivement la science est la connaissance de la Réalité, une réalité en soi, objective, indépendante des observateurs qui la décrivent. Il postule l'existence d'une réalité stable, extérieure et indépendante du sujet. Cette réalité peut être appréhendée par l'expérience scientifique ou la méthode expérimentale. La connaissance qui en résulte est alors considérée comme étant le miroir de la réalité. Le rôle de l'observateur ou du chercheur serait alors de rendre compte de la réalité, en adoptant des attitudes d'objectivité et de neutralité vis-à-vis l'objet de recherche et en utilisant des méthodes supposées lui permettre de la découvrir et de la décrire telle qu'elle existe.

Le constructivisme met de l'avant l'importance de l'interaction du sujet connaissant et de l'objet observé dans la construction de la connaissance. Il révèle ainsi le caractère constructif, récursif et relatif du savoir. Le constructivisme se différencie du positivisme par le statut qu'il attribue aux connaissances et par la représentation de leur mode de production. Dans la perspective constructiviste, la connaissance est une représentation de l'activité cognitive et, en ce sens, elle implique un sujet connaissant et n'a pas de sens ou de valeur en dehors de lui (Le Moigne, 1995). Le constructivisme nous invite à sortir du dualisme sujet-objet. Nous ne connaissons pas une réalité en soi, constituée d'objets dotés d'une essence propre, indépendante de l'action du sujet connaissant qui l'expérimente et la décrit. Nous ne connaissons que les représentations par lesquelles nous percevons les phénomènes dont nous expérimentons les sensations. Si le positivisme admet l'interaction, elle est considérée comme un biais qu'il faut chercher à atténuer. La rupture amenée par le constructivisme se situe notamment dans la reconnaissance scientifique de la dialectique : l'opérateur récursif liant sujet et objet qui est au centre de la production de la connaissance. Du point de vue constructiviste, les connaissances produites sur un objet seraient inévitablement entachées de la manière dont il les a préalablement perçus. Le chercheur construit l'objet de son étude dès lors qu'il l'approche, et cette construction dépend fortement, voire nécessairement, de présupposés qu'il fait sur celui-ci.

Le paradigme constructiviste brise l'illusion du positivisme au regard de la neutralité de l'observateur vis-à-vis l'objet de sa recherche, en se distanciant du postulat de la séparativité sujet-objet et en postulant l'interaction sujet-objet inévitable et nécessaire dans la construction de la connaissance. Tout objet pensé est alors un construit, et la connaissance produite est le résultat d'interprétations d'individus situés dans des contextes sociaux, culturels et physiques donnés qui influencent son élaboration. En attribuant à l'acte du sujet connaissant un rôle décisif dans la construction de la connaissance, le constructivisme a pour corollaire l'intentionnalité du sujet, c'est-à-dire son projet de connaissance. L'interaction sujet/objet repose sur l'intentionnalité de l'acteur connaissant. Dans la perspective constructiviste, la connaissance scientifique ne peut prendre valeur de vérité absolue mais constitue des modèles satisfaisants de représentations du monde dans des contextes et par rapport à des projets conçus. Au lieu de prétendre que la connaissance puisse représenter un monde au-delà de notre expérience, toute connaissance sera considérée comme un outil dans le domaine de l'expérience.

Encadré II-1 Positivisme et constructivisme, principalement inspiré de Do (2003)

1. La gestion intégrée des résidus organiques d'un territoire par la construction de scénarios pour leur retour au sol

L'accumulation croissante de résidus organiques constitue une menace pour le développement de la Réunion. L'île constitue en cela un « cas d'école » d'une des situations type évoquées dans l'introduction de cette section. Une politique nationale y soutient financièrement le développement des filières animales. Un objectif difficile à atteindre dans une situation où ces filières se trouvent bloquées par les contraintes réglementaires régissant le devenir des effluents indissociables de leur production. En effet, tant que ces effluents constituent des déchets dans ce cadre réglementaire ils doivent composer avec une surface d'épandage rare, du fait du contexte topographique, et concurrencée, du fait du contexte démographique. De manière quelque peu ironique la principale concurrence provient en effet de la part de leur propre marché : la consommation alimentaire de la population de l'île. La croissance de celle-ci, couplée à un processus de mise à la norme à la fin des années 2000 des installations d'épuration traitant les effluents résultant, conduisent à une montée en flèche de la production de boues de station d'épuration dans un contexte de saturation des centres d'enfouissement technique. S'y ajoutent d'autres sources à la recherche de leur « puits » comme l'effluent final de la filière sucre, la vinasse, dont le relargage en mer n'est plus accepté, ainsi que de gros gisements de déchets verts issus de leur collecte à travers de toute l'île instaurée depuis la crise du chikungunya en 2007.

Dans une telle situation le chercheur légitimé, en occurrence par les travaux de ses prédécesseurs, n'a pas besoin d'une très grande force de conviction pour motiver les acteurs à s'engager dans une réflexion transversale. Cette situation indique également pourquoi il est pertinent qu'une telle réflexion s'appuie sur le concept de territoire : toute solution dépasse nécessairement une logique de filière ; l'ambition d'une solution durable nécessite de placer les « consommateurs » potentiels et actuels des matières au centre, avec qui les « producteurs » ont peu ou pas de contact mais que tous sont susceptibles de solliciter ; aucun des résidus considérés isolément ne répond à l'ensemble des critères d'aucun de ces consommateurs ; et contrairement aux niveaux spatiaux supérieur, le déplacement à l'intérieur d'un territoire peut raisonnablement être envisagé pour l'ensemble des résidus organiques.

Cette mobilité potentielle des matières intervient donc dans la délimitation spatiale du système territoriale d'étude. Au vu de la topographie marquée de l'île et de la difficulté de circulation qui résulte de la conjonction de cette topographie et de la démographie, cette mobilité se limite pour certains résidus – e.g. lisier de porc et broyat de déchets verts – à un côté de l'île plutôt que l'île dans son ensemble. Pour diverses raisons pratiques et en raison du soutien politique relativement marqué nous avons décidé de faire coïncider dans un premier temps le territoire objet d'étude avec la limite administrative du Territoire de la Côte Ouest, une agglomération de 215 mille habitants s'étendant sur une superficie de 536 km². Au cours des travaux décrits ci-dessous cette hypothèse a par endroit été ajustée, notamment en ce qui concerne la mobilisation de certains résidus organiques provenant d'au-delà de cette limite administrative.

a) *Le positionnement collectif de notre unité de recherche face à l'ambition de contribuer à l'identification de solutions aux problèmes que posent les résidus organiques*

Depuis le tout début des années 2000 l'unité Recyclage & risque avait, aussi sous ses dénominations antérieures, à plusieurs reprises et à la demande des acteurs contribué à résoudre des questions de gestion des effluents (Guerrin et Paillat, 2003). Ces travaux mettaient en avant l'intérêt du territoire en tant que niveau spatial, mais elles restaient cantonnées à la considération « isolée » d'une ou deux filières de production animale et ne considéraient pas les potentiels consommateurs des effluents en tant qu'acteurs à part entière. Puis les chercheurs n'y étaient pas eux même porteurs d'une intention, d'une vision de la solution à poursuivre.

C'est sur ces points-là que se démarquent les travaux que j'ai pu réaliser à la Réunion, en collaboration avec Jérôme Queste, avec les collègues de mon unité et avec les autres acteurs. C'est ce changement vers une posture plus constructiviste qui constitue la justification de la délimitation du périmètre retenu pour le cas d'étude que ces travaux ont récemment constitué dans le cadre du chantier institutionnel « Impact des recherches au Sud » (ImpresS⁸, R-1, AS-2). La vision avec laquelle nous, chercheurs, entrons dans ce débat consistait à dire qu'il convient de privilégier le recyclage agricole des résidus avant d'envisager tout autre voie, que ces résidus peuvent seulement donner lieu à des fertilisants conformes aux exigences des agriculteurs s'ils sont considérés ensemble et sans préjugés, et qu'une telle valorisation serait bénéfique pour le développement de l'ensemble des filières/secteurs concernés.

Mais comment coordonner et structurer une telle démarche de concertation ? Et comment engager la partie positiviste de notre collectif de recherche dans une approche constructiviste ? Nous avons clarifié, pour partie chemin faisant, et formalisé nos réponses à ces questions. Aujourd'hui, de plus en plus, le paradigme constructiviste côtoie le paradigme positiviste dans les pratiques de recherche des sciences sociales (Do, 2003). Rien n'empêche d'en faire de même du côté des sciences dites « naturelles ». Dans A-8 je désigne par RORAL (*Returning Organic Residues to Agricultural Land*) une approche du recyclage territorial fondée sur le besoin des deux, le besoin conjoint de réductionnisme et de holisme. Il s'agit là d'une déduction qui partait du constat, ancien dans ce domaine du recyclage (Greenland, 1980), que le paradigme du transfert de technologie y est inopérant. Que, comme l'observent Pohl et Hirsch Hadorn (2008, 2007), il convient de mettre en œuvre des approches inter-voire transdisciplinaires (1) quand le sujet constitue un réel problème social, (2) où les participants/partenaires sont porteurs de réels enjeux, (3) où il y a un intérêt sociétal pour améliorer la situation, et (4) quand le sujet fait l'objet de controverses. Mais, comme l'observait parmi d'autres Pahl Wostl (2007) pour la gestion intégrée des ressources, dont RORAL se réclame, la structuration dominante de la communauté scientifique disciplinaire est un obstacle au développement de telles recherches. C'est bien en conservant deux ensembles de production de connaissances, l'un de type réductionniste et l'autre plus systémique et constructiviste, que notre unité entend relever ce défi. La Figure II.14 illustre la démarche telle que nous la poursuivons depuis le début – vers 2010 – de mes recherches « preuve de concept » à la Réunion. Au cœur de cette démarche se trouve le concept de « promesse plausible » proposé par Douthwaite et al. (2002). Cette promesse systémique initiale serait proposée par l'équipe de recherche et viserait la solution d'un réel problème (agricole), ce qui permettrait de faire adhérer les parties prenantes à la démarche. Dans le cas des travaux sur la

⁸ <http://impress-impact-recherche.cirad.fr/>

Réunion, cette promesse se limitait à la vision indiquée dans l'alinéa précédente. Mais dans notre formalisation générique (Figure II.14), et telle que j'espère le mettre en œuvre dans mes prochains travaux, cette promesse s'appuierait sur la connaissance agronomique contextualisée, à la fois du potentiel agronomique des résidus organiques et des besoins agronomiques des principaux couples sol-culture. Ce n'est ensuite qu'après adjonction de considérations systémiques qu'une promesse plausible peut être formulée et communiquée. C'est ce passage-là, où l'on passe d'indications biophysiques locales au fonctionnement systémique territorial, qui constitue le cœur unifiant de notre collectif. Et c'est là qu'entre en jeu la modélisation systémique, pour une première fois dans la démarche. Son rôle est en principe important au travers de toute la démarche : comme Sayer et Campbell (2002) l'appelaient déjà de leurs vœux, la modélisation systémique peut servir à concevoir le système, à établir une compréhension commune entre les parties prenantes, à identifier les points de levier pour les interventions, à analyser différents scénarios, à constituer la base des systèmes d'aide à la décision, à aider les négociations des parties prenantes, à identifier les indicateurs de performance des systèmes et à faciliter l'évaluation d'impact. C'est surtout au titre de ce dernier point, l'évaluation, que l'équipe de recherche RORAL, après que ses membres aient participé en tant qu'acteur à la co-construction, reprend les résultats intermédiaires élaborés pour d'une part affiner la « promesse » et d'autre part identifier des manques de connaissances nécessitant des compléments de recherche pouvant représenter le retour vers un degré plus ou moins marqué de réductionnisme. La composition du collectif est propice aux arbitrages délicats que nécessite parfois le passage de

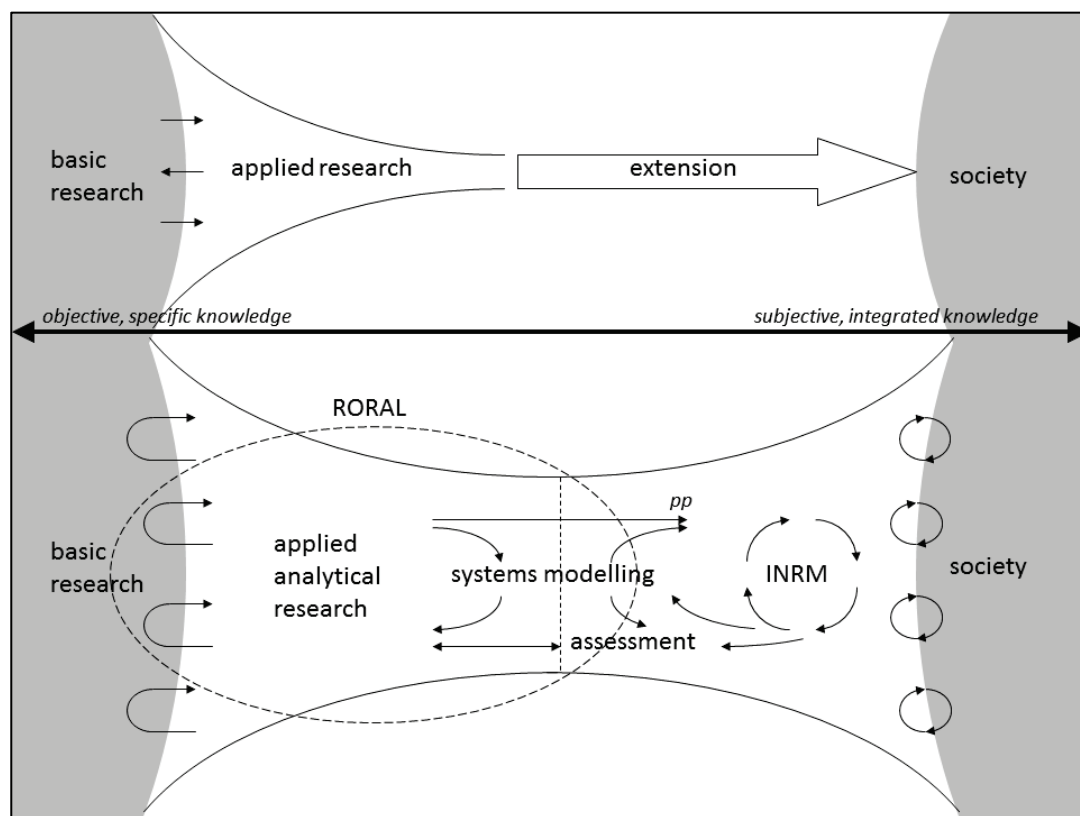


Figure II.14 Top: the linear transfer-of-technology research-development continuum, for reference. Bottom: the proposed epistemological basis for a solid science-society bond in the agricultural development context. All research types and related knowledge are required and complementary, but generating innovation starts at applied research by initiating the generation of the plausible promise (pp). The example of the RORAL research group projected onto this proposed generic FTT implementation (dashed oval) illustrates our view on effective research organization: this 'hard' science group, while being part of the INRM process where it interacts with 'soft' sciences, extends back into basic research. (A-8)

l'interface avec la concertation, ce que Funtowicz et Ravetz (1993) appelaient le dilemme post-normal des chercheurs souhaitant formuler des réponses à de vrais problèmes sociétaux au sein de territoires complexes.

b) La co-construction de solutions par recyclage agricole territoriale

Le ou les chercheur(s) RORAL s'engagent donc en tant qu'acteurs porteur de connaissances parmi les autres dans la co-construction de solutions. Dans l'organisation pratique de telles initiatives il peut même être légitime pour coordonner le processus. Tel était mon cas dans le cadre du projet « preuve de concept » *Gestion Intégrée de Résidus Organiques par leur Valorisation Agricole à la Réunion* (GIROVAR) à la Réunion où l'impartialité du chercheur constructiviste a permis de réunir l'ensemble des acteurs. Mais son rôle d'acteur l'exclut a priori de l'animation, de la facilitation de ce processus de co-construction qui relève de la négociation (Leeuwis, 2000). Dans le cas de GIROVAR ce rôle-là était principalement assumé par Jérôme Queste et ses collègues de l'unité de recherche GREEN.

Mais déclarer cela ne nous dédouane pas d'une implication dans la conception et l'organisation du processus participatif : comment au juste se déroulerait ce processus désigné par *Integrated Natural Resource Management* dans la Figure II.14 et dans A-8, et comment cela s'articule-t-il avec la recherche RORAL ? Dans AS-1 nous présentons les acquis en science de gestion dont nous nous sommes inspirés pour proposer un protocole pratique devant permettre à la science de contribuer plus largement à ce qu'on y désigne comme la gestion environnementale régionale : les concepts de gestion adaptative, de co-gestion et de co-gestion adaptative, puis les approches par forums hybrides, par arènes publics, l'importance des méthodes d'échange de connaissance, d'apprentissage social, de l'exploration par scénarios, de modélisation participative et d'accompagnement, et celle de « suivi de technologie » de Douthwaite et al. (2002) déjà mobilisée dans A-8. Le protocole participatif que nous avons conçu, et testé à la Réunion, peut être résumé comme basé sur un jeu de trois arènes de dialogue distinctes, réunissant des représentants de différents niveaux pour un même ensemble de groupes cibles, couplé à un processus de co-construction selon une logique de « suivi de technologie ». L'interaction ordonnée entre ces arènes permettant de progressivement affiner une solution partagée, estimée comme pertinente par les représentants au niveau pratique (i.e. les personnes directement concernées par l'action au tour du problème), comme crédible par les représentant au niveau technique (dont les chercheurs), et comme légitime par ceux au niveau institutionnel.

Nous estimons qu'un guide méthodologique précis et rigide serait contreproductif et ne proposons que quelques principes régissant ce processus adaptatif par nature. Le niveau « technique », de composition variable, joue un rôle central. Il initie le processus par la formulation d'une promesse initiale sur la base d'un diagnostic technique : un diagnostic ouvertement partiel donc, invitant ainsi les participants des autres arènes à se saisir de cet « objet frontière » (Mollinga, 2010). Au cours du processus itératif qui s'en suit, cette arène technique choisit à chaque étape l'ordre de consultation entre d'une part l'arène institutionnel, permettant de vérifier la compatibilité avec les orientations politique tout en légitimant – après ajustement le cas échéant – les choix proposés, et d'autre part l'arène des praticiens, permettant de vérifier la pertinence des orientations, et le cas échéant les ajuster ou affiner. A chaque étape elle considère les résultats d'une consultation avant de convoquer l'autre arène au sujet des implications : c'est à ces occasions que les acteurs du niveau technique réalisent ou font réaliser les diverses évaluations et que les chercheurs RORAL s'investissent dans des recherches en évaluation logistique et environnementale (cf. la Figure II.14). La promesse plausible évolue ainsi vers une modélisation conceptuelle, puis vers des schémas d'implémentation de plus en

plus précis et détaillés. En fonction de cette évolution, la composition des arènes elles-mêmes peut être amenée à changer au cours du temps.

Plusieurs communications et articles décrivent le déroulement effectif de ce processus mis en œuvre à la Réunion dans le cadre du projet GIROVAR (C-1, A-6, O-5, C-5, C-6, Po-3, R-3), illustré dans la Figure II.15. Ce travail a abouti à la formulation de deux scénarios « consolidés » dont les principales caractéristiques des circuits de valorisation de PRO proposés sont résumées dans le Tableau II-4. Une des particularités de ce cas d'étude concerne le nombre et la force des contraintes qui régissent le devenir des PRO à la Réunion. Ces contraintes sont d'ordres réglementaire, logistique, topographique, économique, agronomique, sociologique, environnementale et technique : une situation complexe justifiant pleinement le recours à la démarche participative, car – au-delà des justifications indiquées précédemment – impossible à saisir et considérer « en chambre » par une approche experte. Par conséquent les voies de valorisation retenues (1) visent la production de fertilisants normés et (2) privilégient autant que possible la production d'engrais « concentrés ». Où « autant que possible » cache le raisonnement délicat et potentiellement conflictuel d'un compromis en situation de forte incertitude. La Figure II.16 l'illustre en partie : ce compromis se situe pour le fertilisant organo-minéral de cette figure entre un produit satisfaisant les besoins nutritionnels des cultures à partir des seuls nutriments contenus dans les PRO, mais devant être apporté à une dose tel que son marché s'en retrouve très réduit, et un produit dont la concentration correspond aux demandes du marché, mais

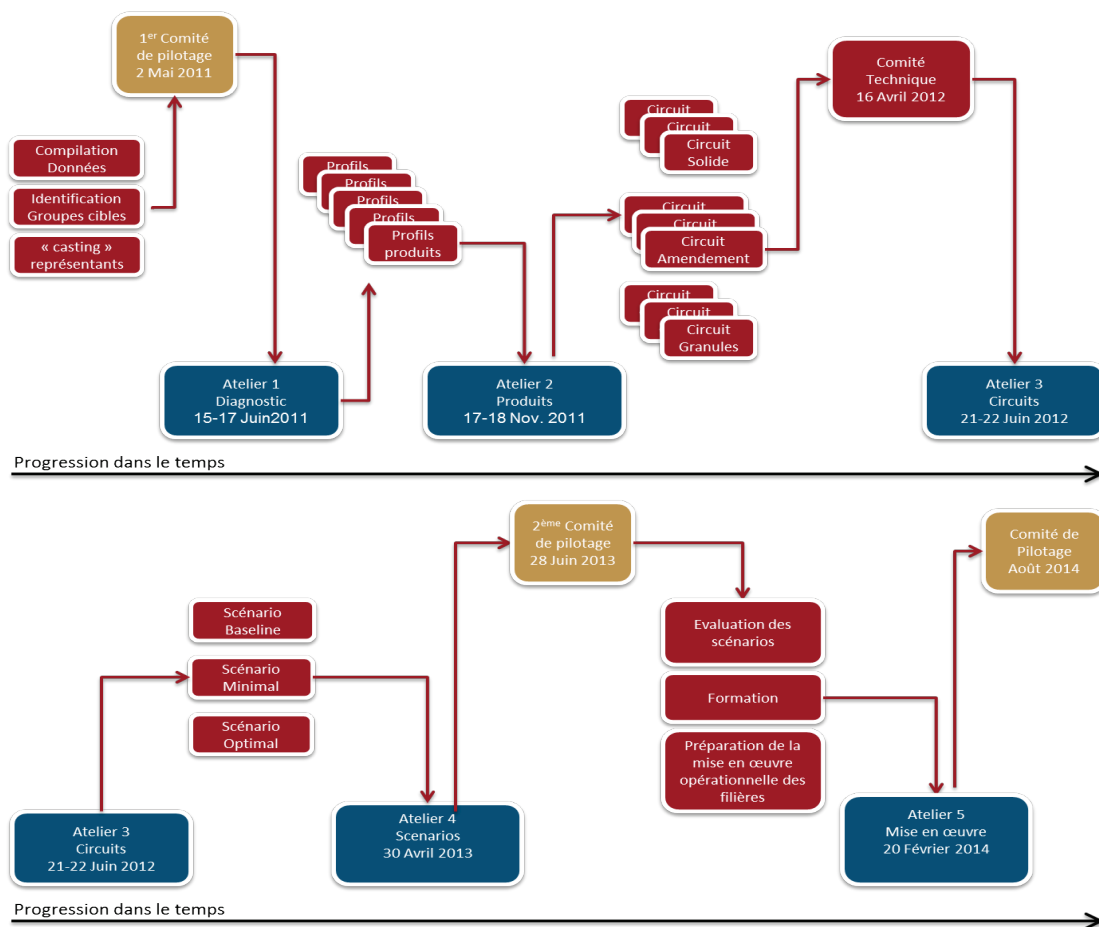


Figure II.15 Etapes de co-construction, mettant en évidence les interactions entre les niveaux de concertation institutionnel (beige), technique (rouge) et pratique (bleu) (A-6).

dont la complémentarité minérale est tel que son prix le rend peu compétitif et que la composition ne

satisfait plus la norme visée. Un compromis d'autant plus délicat à définir que les hypothèses sous-jacentes sont incertaines : l'absence de références techniques sur « l'efficacité » agronomiques des PRO en milieu tropical en général et à la Réunion en particulier ont amené les acteurs à retenir provisoirement des valeurs pouvant être qualifiées de faibles, minimisant ainsi le risque agronomique, mais pénalisant – à juste titre ou pas – la viabilité de la solution (A-2). C'est un résultat qui a contribué à l'avènement tardif d'essais agronomiques actuellement conduits à la Réunion. C'est aussi un exemple de la posture post-normale indiquée dans la section précédente et que nous retrouverons dans la section suivante portant sur l'évaluation environnementale.

			Matières en entrée	Procédé	Matières en sortie
scénario minimal	scénario optimal	CC-LLB : co-compost de lisier de porc, litière de volaille et de broyat de déchets verts	47% de broyat de déchets verts, soit 8 400 t MB/an 20% de litière de volaille, soit 3 600 t MB/an, hypothèse : 14/22 élevages 33% de lisier de porc, soit 6 000 t MB/an, hypothèse : 5/19 élevages	co-compostage en casiers avec retournement besoin surfacique : 8 000 m ² besoin d'équipement : 1 tractopelle et 1 mélangeur mobile besoin de manutention : 4 jh/semaine	Co-compost normalisé NFU 44 051 teneurs N-P ₂ O ₅ -K ₂ O 1,6 -1,6 - 2,1 % 6 000 t/an + 2 000 t/an de refus Siccité 70%
		CC-FVB : co-compost de fientes de poules pondeuses, de vinasse concentrée et de broyat de déchets verts	52% de broyat de déchets verts, soit 2300 t MB/an 34% de fiente de poules pondeuse, soit 1 500 t MB/an, hypothèse : 1/1 élevage 14% de vinasse concentrée, soit 600 t MB/an, hypothèse : projet de concentration réalisé	co-compostage en casiers avec retournement besoin surfacique : 2 800 m ² besoin d'équipement : 1 tractopelle et 1 mélangeur mobile besoin de manutention : 1 jh/semaine	Co-compost normalisé NFU 44 051 teneurs N-P ₂ O ₅ -K ₂ O 1,6 - 1,4 - 3,5 % 1 900 t/an + 500 t/an de refus Siccité 70%
EOM-LLB : engrais organo-minéral à base de CC-LLB		~5000 t MB/an de CC-LLB complément d'engrais minéral	une chaîne industrielle de mélange une chaîne de compression (à froid) et de granulation 3-5 t/h : 8-12000 t/an	~6 000 t/an d'engrais organo-minéral, en granules teneurs N-P ₂ O ₅ -K ₂ O 5 - 4 - 8 % NFU 42 001	
EO-FVB : engrais organique à base de CC-FVB		1900 t MB/an de CC-FVB 340 t MB/an de farines animales (plumes et sang)	besoin surfacique : minimum 6 200 m ²	1 900 t/an d'engrais organique, en granules teneurs N-P ₂ O ₅ -K ₂ O 4 - 2 - 4 % NFU 42 001	

Tableau II-4 Principales caractéristiques techniques des procédés de transformation des circuits de valorisation (A-6).

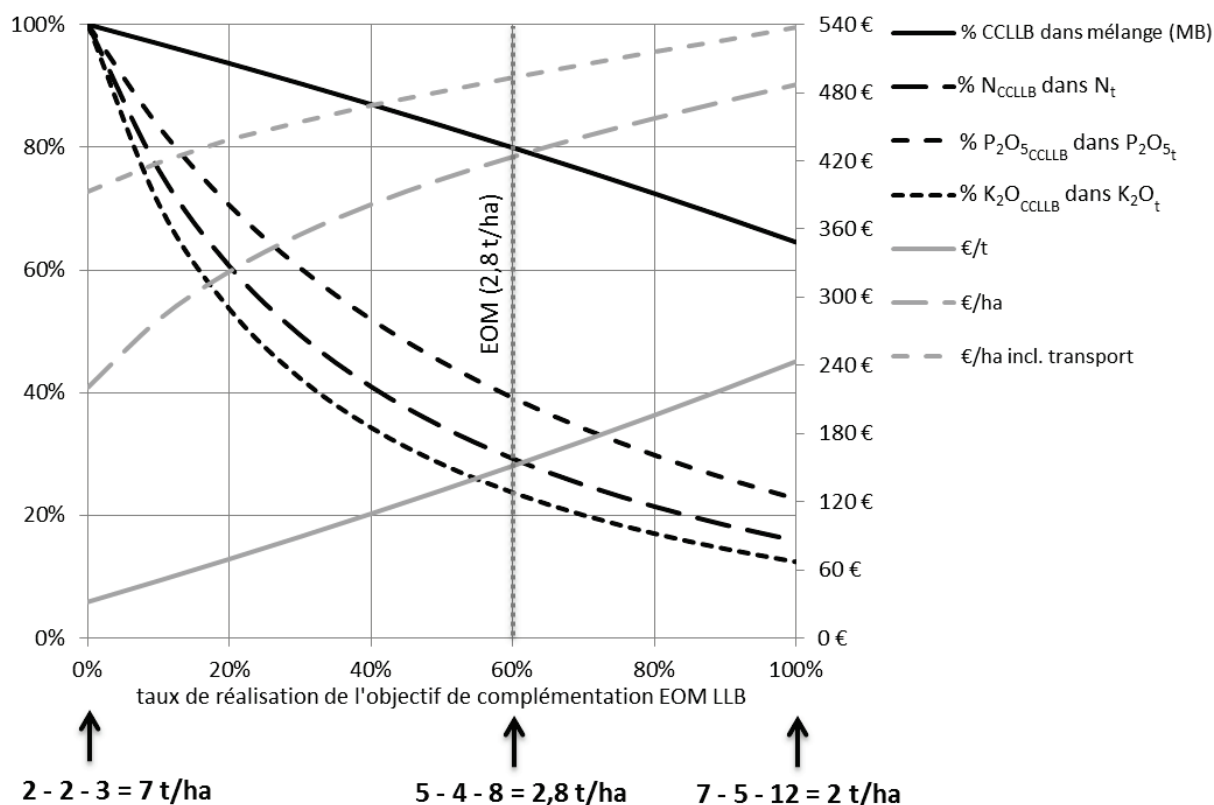


Figure II.16 Effet de la complémentation minérale sur la proportion du co-compost à compléter et des éléments majeurs issus de ce co-compost dans le produit final (ordonnée de gauche), et sur le coût de la fertilisation (ordonnée de droite) (A-2).

La section précédente et la Figure II.14 indiquaient que la modélisation systémique a une place importante voire centrale dans la démarche de recherche de notre unité tout comme dans les démarches de co-construction qu'elle entend initier. Dans le cas du projet GIROVAR elle n'a, comme également déjà indiqué, pas contribué à la formulation de la promesse plausible. Mais elle a bien contribué aux évaluations des co-constructions intermédiaires, que ce soit sur le plan logistique, économique ou environnemental. Sur le plan environnemental nous n'avons pu avancer jusqu'à la simulation dynamique de conséquences que sur un seul point (cf. la section suivante, II.D.2), faute de temps, bien que notre capacité de modélisation y est aussi tributaire des avancées de nos recherches portant sur la simulation dynamique de processus biophysiques à l'échelle du territoire.

Mes travaux de modélisation dans le cadre de ce cas d'étude à la Réunion, toujours en cours de valorisation (R-2, L-1), se limitent de ce fait à la représentation de l'action – actuelle et envisagée – des acteurs humains sur les PRO, communément désigné par le terme « modélisation systémique ». Ces travaux se sont inspirés des travaux de mes collègues (Courdier et al., 2002; Guerrin, 2008, 2001) et ont débouché sur un simulateur informatique permettant d'apprécier le fonctionnement des scénarios co-construits, affublé de l'acronyme UPUTUC (Unités de Production, Unités de Transformation, Unités de Consommation). Il s'agissait d'un chantier non dénué d'ambition dont la première étape consistait en une modélisation conceptuelle : un travail d'explicitation détaillée du fonctionnement des « circuits » de valorisation composant les scénarios co-construits, reprenant l'ensemble des règles et hypothèses retenues au cours de ce processus. Dans un second temps il a fallu recueillir et construire les jeux de données correspondant aux entités de ce modèle conceptuel, avant d'accompagner l'implémentation de ce modèle au sein d'une plateforme de simulation informatique. Le choix de ce

dernier (AnyLogic®) et du formalisme multi-agent ont permis de créer un outil pratique car rapide sans que cela ait nécessité quelconque compromis en termes de résolution – pourtant détaillée – des entités représentées. L'effort consenti a pu paraître démesuré aux yeux de certains partenaires et son aboutissement tardif a limité son utilisation, mais des considérations de plusieurs ordres le justifient :

1. même si intervenant tardivement, son *utilisation au sein du processus* de co-construction est crucial car c'est l'unique moyen de vérifier que ce qui a été imaginé en décomposant la « réalité » complexe ait une chance de correctement fonctionner en tant qu'ensemble. Cela sert donc à identifier des oublies ou des suppositions erronées ou des incompatibilités, et une fois résolus cela sert, comme indiqué, à renseigner les évaluations ;
2. c'est aussi un *instrument crucial d'une démarche* qui se veut scientifique, dans la mesure où elle oblige (1) à consigner et à expliciter en un seul endroit l'ensemble des décisions et hypothèses retenues ; (2) à formaliser la connaissance des acteurs, notamment ceux de l'arène technique ; (3) à (obliger à) mettre en commun des jeux de données détenus par différents organismes, sans forcément les partager ;
3. en dehors du cadre d'application il s'agit d'une *plateforme* qui est a priori à même d'*accueillir et d'articuler* l'ensemble des formalismes de représentation dynamique de processus – de quelque nature que soient ces processus – que visent à produire les chercheurs de l'unité. Il s'agit donc d'une production à faire fructifier sur le plan scientifique, tout comme sur le plan du développement grâce aux perspectives d'application que ces avancées méthodologique fourniront.

2. L'estimation de conséquences environnementales pour éclairer la prise de décision

Au-delà de leur intérêt propre, les travaux résumés dans les parties précédentes de la présente section II.D avait une visée instrumentale : constituer un cadre constructif et constructiviste pour le développement de recherches en évaluation environnementale, correspondant à ma mission – du moins initiale – au Cirad. Mais en s'y attardant un instant on s'aperçoit vite de l'incongruité du terme « évaluation environnementale » comme label de recherches ou d'un chercheur. L'emploi du terme « environnement » dans la présente section a jusqu'ici été très parcimonieux. Ce terme posait peu de questions dans la section II.C précédente concernant des travaux d'une nature plus normative. Mais est-ce qu'une approche normative est appropriée ici où nous nous sommes placés dans le contexte local et concret d'un territoire avec le but affiché d'informer ses acteurs des possibles conséquences d'une action au sein de ce territoire ? Peut-on y mobiliser les cadres, méthodes et outils normatifs existants, plus généralement utilisé pour une appréciation relative dans un contexte comparatif ? Il a suffi de questionner les représentants de l'arène pratique pour se rendre compte qu'il s'agit-là d'une notion tout aussi éminemment constructiviste qu'observé pour le terme territoire en introduction de la présente section.

Et que dire du terme « évaluation » ? Oui, le constructivisme brise l'illusion de la neutralité de l'observateur vis-à-vis l'objet de sa recherche. Et nous acceptons aussi, et l'assumons dans le cadre RORAL, que le chercheur-acteur n'est pas aussi objectif et neutre que le positiviste le pense, qu'il véhicule lui-même des valeurs. Mais justement : s'il est légitime pour participer au débat autour d'informations qu'il a lui-même mis en discussion, ce n'est donc pas dans son seul cadre de valeurs à lui qu'il faut interpréter ces informations, ce que soutient pourtant le terme évaluation quand il est présenté comme une activité scientifique. Comme l'indique le titre ci-dessus, plus que d'évaluation nous nous saisissons d'une mission d'estimation. Où nous ne pouvons du coup plus parler d'impacts non plus, bien que si courant dans cette communauté scientifique qui se réclame de l'évaluation environnementale, remplacé par *conséquences*, sur lesquelles d'autres seront amenés à dire à quel point et pour qui ils constitueraient des impacts. Si cela règle en principe cette partie du flou entourant ma mission, restait donc le besoin d'identifier ou de créer un cadre permettant d'accueillir toutes les visions sur la notion d'environnement, et de les traduire en indicateurs à renseigner. Tel était la première, et finalement principale, mission que nous avons cherché à accomplir avec François Dumoulin dans le cadre de sa thèse de doctorat (Dumoulin, 2016), objet de la première sous-section ci-dessous. Dans la sous-section suivante nous présentons quelques travaux d'estimation de conséquences que nous avons pu mener dans le cadre du projet GIROVAR et respectant ce cadre de conséquences environnementales.

a) La conception d'un cadre pour informer la co-construction des possibles conséquences environnementales

Aucun des cadres normatifs existants ne convenait à notre cadre de co-construction de scénarios territoriaux, que ce soit e.g. celui des études d'impact environnemental, d'analyse de risque environnementale ou de l'analyse de cycle de vie (ACV). Que ce soit en raison de leur nature normative ou d'un focus inadapté et/ou trop restreint par rapport à l'ouverture avec laquelle il convient d'aborder le sujet dans notre situation. Deux possibilités s'offraient alors à nous : adapter et/ou combiner ces cadres ou d'en construire un *ex nihilo*. Adapter les existants leur fait perdre une partie de l'intérêt qu'ils

ont en tant que cadre normatif, tandis que cela pourrait entraîner un degré de changement tel que l'on ne pourra plus raisonnablement se réclamer du cadre initial sans que pour autant cela nous garantisse une base saine. François Dumoulin présente ainsi dans sa thèse de doctorat un inventaire de caractéristiques de l'ACV, méthode très en vogue justifiant ce traitement « particulier », qu'il conviendrait d'adapter (Dumoulin, 2016, en partie dans A-7). C'est exactement ce problème de « dissolution » du cadre qui se pose avec la question de « territorialisation » de l'ACV, une orientation dans laquelle la communauté respective s'est engagée. Seul Reinout Heijungs, un des fondateurs de l'ACV, a cherché à en poser les limites (Heijungs, 2012), qualifiant ces pratiques de plus en plus courantes par une métaphore : l'utilisation d'un tournevis pour ouvrir une fenêtre (communication personnelle). Une métaphore qui me rappelait certaines pratiques en télédétection (les pratiques en OBIA et l'utilisation du NDVI, voir section II.B.3 et A-10). Nous avons donc retenu la seconde option : construire un nouveau cadre adapté à notre situation de recherche participative, sans toutefois exclure d'y faire appel à des (éléments de) méthodes existantes.

L'environnement est une notion polysémique et il apparaît donc nécessaire qu'un cadre général destiné à la discussion entre différents acteurs intègre leurs différentes perspectives environnementales. L'environnement est reconnu comme constituant une réalité intermédiaire (Descola, 2011) dont la représentation est relative aux individus (Theys, 2010). Il s'agissait alors de construire un cadre de représentation de l'environnement, à la fois générique et commun pour des acteurs et qui ne tombe pas dans des individualités. Ce que nous recherchions était un cadre logique⁹ permettant une représentation partagée, requis par notre contexte décisionnel. Les éléments constitutifs d'un tel cadre ne peuvent donc reposer uniquement sur des sciences naturelles et l'ingénierie, mais plutôt sur des sciences sociales ayant trait aux relations intrinsèques entre les hommes et l'environnement. Nous avons ainsi cherché dans les trois disciplines principalement concernées (Morel et al., 2010; Theys, 2010) – l'économie, la géographie et l'anthropologie – les éléments clés d'un tel cadre. Le résultat de ce travail, résumé ci-dessous est consigné dans A-1, A-7, C-3, Po-1.

L'environnement est conçu au travers de la relation objet-sujet, où objet et sujet sont pluriels. Dans une co-conception de gestion territoriale, alors que les sujets peuvent être identifiés et être le point de départ de l'évaluation, les objets avec lesquels ils nouent une relation¹⁰ doivent être identifiés. Ces relations relevant d'un point de vue économique sont essentiellement de nature fonctionnelle (Siebert, 2008) avec un tel projet, dans ou au-delà du territoire. En anthropologie, ces relations ont trait à des milieux physiques qui rendent possible la vie (Morel et al., 2010) et donc peuvent affecter la population. Du point de vue des sciences géographiques, ces relations relèvent de toutes matérialités physiques (Le Berre, 1995) à l'intérieur du territoire qui pourraient être affectées par le projet. Les différents champs disciplinaires étudiés présentent différentes façons d'apprécier les objets « naturels ». Nous en distinguons deux, entre d'une part les relations fonctionnelles où les objets sont des facteurs de production (en géographie et économie) et non-fonctionnelles d'autre part, où les changements des objets affectent directement les humains, moralement ou physiquement. Cette

⁹ Qui, au sens de Kant, « expose dans le détail et démontre avec rigueur les règles formelles de toute pensée », celle relatif à l'environnement en occurrence.

¹⁰ Notez que cette interaction sujet-objet nous renvoie au paradigme constructiviste, voir Encadré II-1.

distinction permet un partitionnement mutuellement exclusif et conjointement exhaustif des relations entre elles¹¹.

L'évaluation des objets environnementaux est également influencée par leur proximité (November 2004) avec les acteurs. Que ce soit en économie au travers notamment des externalités du système économique (Siebert, 2008), en anthropologie de manière sensitive ou affective via la perception de conséquences (Joireman et al., 2001), en géographie en termes d'usages (Le Berre, 1995). Cette proximité permet un second partitionnement de l'environnement impacté par l'action, où ces conséquences concernent soit le territoire (local) des acteurs ou se situent au-delà (global). Cette distinction est importante car elle influe sur la nature de la relation objet-sujet.

Un dernier élément clé de représentation de conséquences environnementales que nous avons identifié est la dimension temporelle. Celui-ci intervient tant au travers de la dynamique des conséquences elles-mêmes, que de l'importance de leur considération. Selon les sciences sociales, un individu agit en fonction de sa perception d'impacts écologiques, plus que d'impacts en soi (Boons and Howard-Grenville, 2009). Ainsi, la valeur conférée à des conséquences environnementales futures possibles d'une action varie d'un individu à un autre, où un niveau élevé de *consideration of future consequences* (Strathman et al., 1994) révélerait un comportement « pro-environnemental » (Joireman et al., 2001). De la même manière, des théories économiques accordent aussi une grande importance à l'aspect temporelle des conséquences, notamment au travers du concept de futurité (Commons, 1950) caractérisant la capacité d'un individu à agir en perspective des conséquences futures de ses actions.

Le cadre sur lequel débouche cette analyse peut être caractérisé comme anthropocentré, mais il s'agit de ce que Norton (1984) qualifie d'anthropocentrisme *faible* : il ne s'agit pas de chercher à satisfaire l'ensemble des préférences *ressentis* des individus – les désirs et besoins isolés de toute critique ou objection – mais d'englober toutes les préférences *considérées* et rationnellement évaluables. Une préférence *considérée* est le désir ou le besoin qu'une personne exprimerait après mûre réflexion, y compris un jugement selon lequel le désir ou le besoin est compatible avec une vision du monde rationnellement adopté (Norton, 1984). Un élément qu'il convient de souligner, car c'est cela qui confère un rôle centrale au chercheur, que ce soit pour proposer des conséquences à estimer, pour en sélectionner au travers d'une critique dialectique de propositions, ou pour les estimer. Ces possibles conséquences-là, que nous désignons par le terme phénomènes d'intérêt, sont recherchées, en suivant notre cadre, dans trois types d'environnement distincts, dénommés l'environnement des habitants, l'environnement métabolique et l'environnement global (A-1). Sans tous les détailler, le second mérite qu'on s'y attarde un instant. Il se réfère à ce qu'en écologie industrielle s'appelle le *métabolisme industriel* – j'y reviendrai – et désigne donc l'environnement *fonctionnel* : il s'agit de composantes biophysiques du territoire constituant une partie intégrante du/des système(s) de production, pour le(s)quel(s) elles constituent des facteurs de production, mais que les représentants dans les arènes de concertation désignent comme appartenant à l'environnement. Bien que cela découle simplement de notre cadre logique, il y a un intérêt particulier à cela dans notre démarche RORAL : Cela permet de respecter la vision du monde dichotomique dominante dans l'échange avec les autres acteurs, sans que le chercheur soit contraint de partitionner, en amont de son travail

¹¹ Conforme, encore une fois, à ce que mes travaux en classification en télédétection m'avaient enseigné (section II.B.3).

d'estimation, son système d'étude en deux sous-ensembles figés et constant. Si tel est bien la pratique courante en « évaluation environnementale », une telle contrainte nous poserait en effet d'importants problèmes :

- Tout d'abord, en imposant ainsi l'objet, cela représente un non-respect du paradigme constructiviste, i.e. la dépendance de l'objet de sa relation avec le sujet. Tandis que notre cadre pose trois environnements de nature, et donc de limite, distinctes. Mais même au sein de ceux-là il autorise des variations entre phénomènes d'intérêt, et même entre limites employés pour renseigner différents indicateurs renseignant sur un même phénomène. C'est un point, et un avantage, de notre approche qui me semble crucial et que la sous-section suivante illustrera ;
- Cette pratique courante où la recherche part d'un partitionnement figé entre un ensemble « agissant » et un ensemble « subissant » entraîne en pratique généralement une focalisation excessive sur cette limite même. Cela atteint son paroxysme en ACV, dans sa version normée, où il n'y a plus que le passage de cette limite qui est étudié ;
- Dans un travail localisé, territorialisé, un tel partitionnement s'avère simplement impossible à matérialiser, du moins avec un minimum de rigueur scientifique ;
- Même dans un cadre positiviste, cette limite est toujours particulièrement délicat à établir pour des systèmes d'étude composés de, ou comprenant des, activités agricoles. Les travaux en ACV agricole de van Zelm et al. (2013) illustrent bien cette difficulté : ils proposent de faire correspondre l'environnement à ce qui se trouve en dessous de 20cm de profondeur dans le sol et au-delà de 2m au-dessus du sol, là où nos environnements comprennent les sols et les

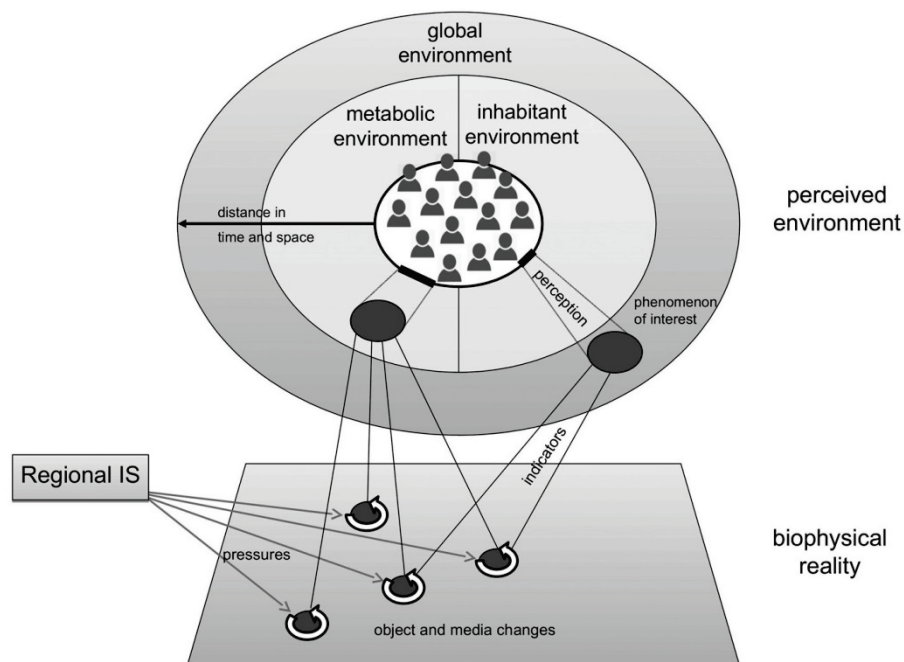


Figure II.17 Schematic representation of the logical basis accommodating for all facilitated regional industrial symbiosis (FRIS) stakeholders' perceptions of the environment and environmental consequences. The anthropocentric classification proposes a symbolic space of subjective valuing. It puts stakeholders at the center, surrounded by the three environments. The extent of a change in any of these environments is depicted by the dark circle sizes. The angle between the sides of the cone projecting the estimated change onto the subject sphere illustrates its futurity regarding a given considered phenomenon of interest. IS = industrial symbiosis (A-1).

cultures agricoles, conformément à plusieurs visions d'acteurs classant la fertilité du sol et la contamination des cultures parmi les préoccupations environnementales.

La Figure II.17 illustre non seulement notre cadre d'estimation de conséquences, mais aussi comment s'y articulent, tel que poursuivi dans notre approche RORAL, la recherche constructiviste et positiviste. Si je me suis pour l'heure limité à la première, il s'agit bien de mettre en relation les phénomènes d'intérêt, une fois identifiés, avec une réalité matérielle dont il convient d'admettre, du moins de supposer, l'existence. Comme l'illustre cette figure cette relation est constituée d'indications fournies par des indicateurs informant sur le risque et/ou la magnitude de changement d'état d'objets, de composantes, biophysiques réels. Cette relation-là correspond à celle indiquée entre « assessment » et « analytical research » en bas de la Figure II.14, du moins quand le renseignement des indicateurs fait appel à la recherche. Mais, constructivisme oblige, il convient de vérifier la validation de cette proposition d'indicateurs en considérant non seulement la validité et la conformité scientifique (validation de la conception), la fiabilité et la précision (validation de sortie), mais aussi son utilité pour les bénéficiaires (validation de l'utilisation finale) (Bockstaller and Girardin, 2003).

L'application de notre cadre d'analyse au cas du projet GIROVAR a permis d'identifier un total de neuf phénomènes d'intérêt à renseigner (A-1) :

- cinq dans l'environnement des habitants :
 - L'exposition aux odeurs de compostage et d'épandage
 - L'exposition au bruit dû aux transports
 - La présence de polluants dans les légumes
 - La présence de polluants dans l'eau potable
 - L'impact visuel dans le paysage
- deux dans l'environnement métabolique :
 - L'évolution de la fertilité des sols
 - Le transfert de contaminants vers la plante
- deux dans l'environnement global :
 - Le bilan climatique lié aux émissions de GES
 - Le changement dans la mobilisation de ressources non-renouvelables (P, K, énergie)

Je résume ci-dessous une partie du travail correspondant de sélection et de renseignement d'indicateurs informant sur ces phénomènes que nous avons pu mener. Le cas de la contribution au changement climatique illustre une des situations illustrées par la Figure II.17, celle d'un phénomène où l'indication résulte de l'agrégation d'un grand nombre de (changements de) processus biophysiques induits ou évités par la réalisation du scénario envisagé. Un cas familier tant par rapport à l'ACV que par rapport à mes travaux plus anciens, sauf qu'ici deux indicateurs distincts informent sous des angles quelque peu différents des acteurs aux préoccupations distincts. Les cas des contaminations en composés organiques et en éléments trace illustrent l'autre situation illustrée par la Figure II.17, celle de (changements de) processus biophysiques induits qui participent, parmi d'autres, dans plusieurs phénomènes d'intérêt.

b) L'estimation des conséquences des scénarios : les cas de la contribution au changement climatique, des éléments trace et des contaminants organiques

Classiquement et quasi universellement, les émissions de GES sont exprimées en *équivalent CO₂*, i.e. le forçage radiatif produit sur un horizon temporel de 100 ans par l'émission d'un gaz donné à un instant donné, par rapport à celui produit par le dioxyde de carbone. Un choix commode et généralement approprié, car il permet d'agréger la diversité souvent importante d'émissions en un *potentiel de changement* (anciennement *réchauffement*) *climatique*. Ce qui en plus permet de comparer un tel potentiel à celui correspondant à des ensembles d'émissions produit ailleurs ou à d'autres moments. Mais dans le cas de la co-conception d'un changement de gestion territoriale un tel indicateur pose problème à plusieurs niveaux :

- le fait de fixer ainsi arbitrairement l'horizon temporel apparaît incompatible avec l'importance que notre cadre logique nous incite à accorder à la dimension temporelle ;
- il serait techniquement difficile à mettre en œuvre pour un objet qui n'est pas un produit ou un événement, mais un (changement de) processus qui s'inscrit dans la durée ;
- la normalisation des émissions (par rapport au CO₂) « détruit » des informations qui comptent dans ce type de situation : les différences entre les divers processus contributifs, en termes de dynamique de forçage radiatif produit, ainsi qu'en termes de contribution absolue et relative à un horizon temporel choisi. Car il s'agit de laisser aux acteurs le soin de dire quel horizon compte, et s'il convient d'agir en priorité sur des processus à « impact » rapide ou pas.

Ces problèmes sont évités en optant pour l'utilisation du potentiel absolu de réchauffement global

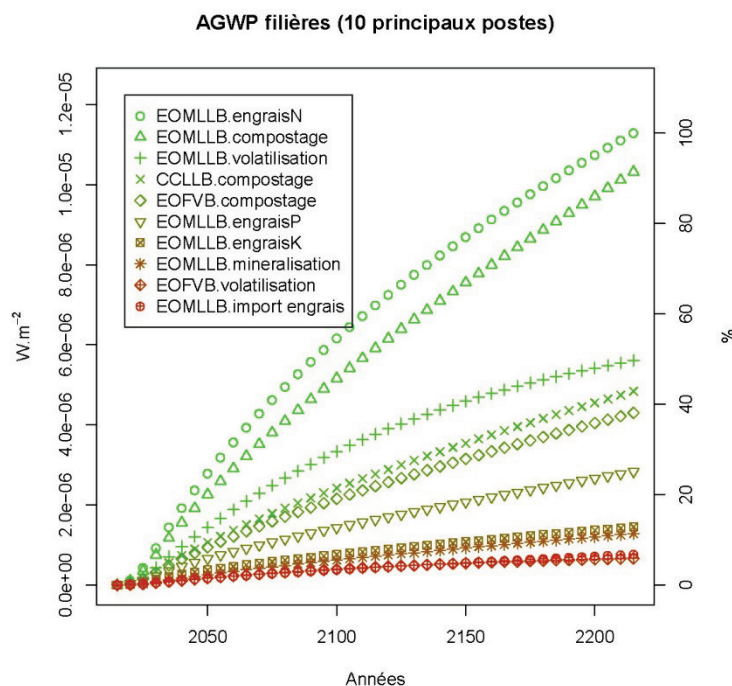


Figure II.18 Projection du potentiel de réchauffement absolu (cumul du forçage radiatif) des processus d'émissions regroupés par produit : affichage des 10 plus importants (Dumoulin, 2016).

comme indicateur (O-4, O-7, C-2), correspondant au cumul temporel du forçage radiatif produit. L'information fournie aux acteurs n'est du coup plus un seul chiffre, mais une graphique, avec une abscisse où chacun est libre de focaliser sur l'horizon temporel de son choix. De telles graphiques

permettent d'informer sur divers aspect : cela peut e.g. permettre d'apprécier la performance respectives de différents scénarios, mais aussi de décortiquer un scénario donné, en termes de (groupes de) processus (Figure II.18) ou autre. Pour un horizon de temps donné, un scénario peut ensuite être analysé sous divers angles comme le montre la Figure II.19 pour un scénario de gestion

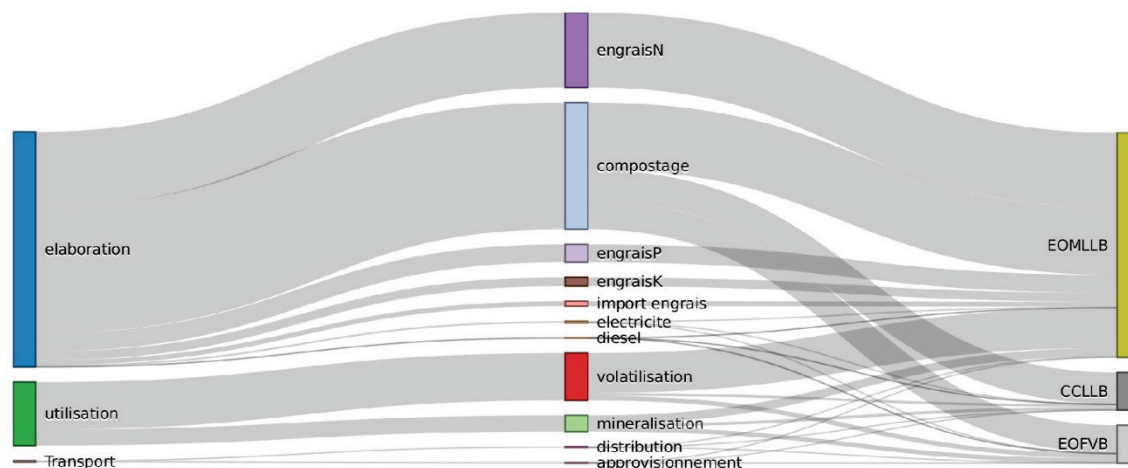


Figure II.19 Eclatement des contributions relatives des sources d'impact à l'horizon 2100 (soit 85 ans après le début de l'implémentation). A gauche entre les groupes d'activités ; au milieu les processus d'émission ; à droite entre les différents produits (Dumoulin, 2016).

qui serait mis en place en 2015 pour une durée de 30 ans, appréciant la contribution au changement climatique à l'horizon 2100 en termes de ses groupes d'activités, de processus génératrices d'émission et de produit. Notez que de telles informations ne peuvent être produites qu'à l'aide d'un modèle de simulation dynamique des scénarios construits, en l'occurrence le modèle UPUTUC (section II.D.1.b).

Comme indiqué juste avant la présente section, l'information sur ce phénomène de l'environnement global intéresse les acteurs à deux titres distincts. Celui auquel je me suis référé ci-dessus peut être désigné comme une information destiné à l'écoconception, donc dans un premier temps à destination de l'arène technique : apprécier sur quel point il paraît important, possible et raisonnable d'ajuster la définition du scénario. Le second concerne une utilisation plus politique de l'information par les représentants de l'arène institutionnelle : apprécier à quel point le scénario co-conçu améliore le bilan climatique du territoire par rapport à la situation actuelle, afin de juger son acceptabilité politique, voire justifier la mise en place de mesures incitatives ou compensatoires. Une situation qui nous a amené à produire une indication concernant le potentiel absolu de réchauffement global respectivement en termes absolu et en termes relatif. Fait intéressant : la différence principale entre les deux indications ne réside dans la variable, mais dans le périmètre des systèmes respectifs ! L'analyse absolu ne s'intéresse qu'aux émissions produites au sein de chaque circuit de valorisation imaginé, partant de la collecte des résidus concernés et s'arrêtant après l'utilisation au champ des produits sortants. Dans le cas de l'analyse comparative, ces circuits sont « insérés » dans le système territorial plus large afin de prendre en compte les « perturbations » que leur mise en place y produiraient, notamment en termes de substitution d'engrais importés, du devenir des résidus en cas de leur non-valorisation et de pratiques alternatives sur des terres recevant certains résidus avant ou en l'absence de la mise en place de ces circuits. Cette dernière analyse, qui fait appel à un certain nombre d'hypothèses parfois fortes, suggère que la réalisation des scénarios co-construits dans le cadre du projet GIROVAR produirait peu ou pas de gain sur ce plan climatique, principalement du fait

que la production de fertilisants les plus concentrés possibles – en termes nutritionnels – y ait été privilégiée, cela pour de nombreuses raisons (section II.D.1.b).

Certains PRO présentent des teneurs significatives en éléments trace métalliques (ETM), de manière chronique pour le zinc et le cuivre dans les effluents de monogastriques, et de manière plus ponctuelle pour e.g. le nickel, le cadmium ou le plomb par des pollutions plus ou moins occasionnelles de gisements tel les déchets verts. La transformation de ces matières en fertilisants normés a tendance à accroître ces teneurs. L'apport au champ de ces ETM constitue un processus qui peut, selon la connaissance générale, contribuer à quatre des neuf phénomènes d'intérêt identifiés : la présence de polluants dans les légumes ; la présence de polluants dans l'eau potable ; l'évolution de la fertilité des sols ; le transfert de contaminants vers la plante.

Il existe des modèles simples pour estimer par bilan de masse ces différents devenir. Mais la paramétrisation de ces modèles, basée sur des équations génériques de régression multiple proposées par la littérature, surestime substantiellement la concentration des ETM dans les organes comestibles des plantes ainsi que dans la solution du sol (Po-2). C'est ce que les résultats expérimentaux obtenus à la Réunion par mes collègues ont permis de démontrer. Ces résultats montrent que dans les conditions spécifiques de la Réunion la mobilité et la phytodisponibilité des ETM, donc leur transfert vers la plante et vers la nappe, sont en règle générale faibles. Ils ont aussi permis de calibrer et de valider un modèle par bilan de masse pour ces conditions spécifiques (Po-2). Son utilisation dans le cadre du projet GIROVAR, principalement pour informer sur l'accumulation des ETM dans le sol comme facteur de sa fertilité, indique que le niveau d'accumulation prédit par le modèle est étroitement lié à la dose d'apport des PRO ainsi que leur concentration en ETM (Pr-1). Pour les produits et leur utilisation tels qu'imaginés dans le cadre de ce projet cette accumulation ne constitue pas une préoccupation à court terme. La simulation de cette dynamique sur une longue durée (e.g. 100 ans) suggère, puisque la connaissance est faible dans ce domaine, un risque faible d'éco- ou phyto-toxicité même à long terme. Mais pour certaines combinaisons de pratiques, de produit et d'ETM certains seuils réglementaires pourraient à terme être franchis (Pr-1).

Les PRO sont aussi porteurs de certaines molécules organiques de synthèse, présentes en très faible quantité, mais que l'évolution des techniques analytiques permet désormais de détecter : une capacité qui génère une vague de travaux expérimentaux générant à son tour une inquiétude sociétale qui rend une appréciation du risque induit nécessaire même si la connaissance générale reste maigre et qu'aucune référence locale n'existe. La préoccupation majeure des acteurs concerne la diversité de contaminants trace organiques (CTO) d'origine variée contenue dans les boues de station d'épuration. Une préoccupation que nous avons tenté d'éclairer au mieux, et qu'il était de notre responsabilité de mettre en perspective par rapport au risque que pourrait revêtir les CTO contenus dans des PRO bien acceptés, tel le lisier de porc, considéré « sain » bien que l'emploi structurel d'antibiotiques soit notoire. L'étude que nous avons menée estime par modèles le devenir des CTO dosés par analyses dans plusieurs lisiers de porc et boues de station d'épuration (A-5). Cela afin de renseigner leur contribution aux mêmes quatre phénomènes d'intérêt affectés par les ETM, ici réduit à trois par le fait que les scénarios co-construits ne prévoient pas l'utilisation de boues, ou de fertilisants faisant intervenir des boues, en maraîchage. Il s'agit là d'une analyse de risque, mais qui diffère de l'analyse

de risque classique et normative destinée aux instances de réglementation¹² par la caractérisation du risque : au lieu d'une mesure de distance par rapport à un seuil de concentration mesuré d'effet sur un organisme vivant sélectionné comme cible, nous avons cherché à produire des indications plus directement en lien avec les préoccupations des acteurs. Il s'agit de la *possibilité* d'une présence *déTECTABLE* de CTO dans les parties aériennes de la canne à sucre, intéressant plus particulièrement les industriels du secteur, concernant l'environnement métabolique ; de la *possibilité* d'une présence *chronique détECTABLE* dans le sol cultivé, intéressant, dans ce même environnement, les planteurs et ces mêmes industriels ; et du risque de lixiviation de CTO, intéressant là plus particulièrement les autorités locales et les organismes responsables de la gestion de l'eau potable, concernant donc l'environnement des habitants.

Une seconde originalité de ce travail, par ailleurs basé sur une approche « classique » estimant de manière résiduelle la concentration dans le sol à l'aide d'un ensemble de taux constant de premier ordre, est d'accorder une attention particulière à l'incertitude. Les modèles que nous avons pu mobiliser pour estimer ces taux (de dégradation ; d'assimilation ; de volatilisation ; de lixiviation) étaient trop approximatifs pour permettre d'établir des distributions de probabilité, mais ils ont permis d'établir, par cumul d'hypothèses extrêmes, une gamme de possibles pour chacun, conforme à la « commande ». Cet exercice n'était pas seulement nécessaire dans le cadre de notre démarche RORAL, mais il revête aussi un intérêt dans le sens où les CTO des PRO posent plusieurs problèmes à l'analyse de risque :

- organique, donc par définition instable, une seule molécule de départ en représente souvent plusieurs à suivre. En théorie, car ces dernières sont souvent peu connues et encore moins détectables analytiquement. Sauf exception (e.g. nonylphénol, lui-même un produit de dégradation), l'analyse de risque s'estime donc contraint d'ignorer les métabolites, même si parfois connues comme dangereuses ;
- même ces molécules de départ elles-mêmes sont très nombreuses, bien que la diversité soit contrainte par le contexte d'origine du PRO. L'analyse de risque fait donc au mieux pour être la moins partielle possible, mais elle l'est forcément car elle doit prédéterminer les substances auxquelles elle va s'intéresser et est en cela aussi contrainte par la capacité analytique des études expérimentales qui la guident. Etant donné cette diversité et au regard de l'intérêt de l'analyse de risque, celle-ci vise souvent à s'exprimer sur une famille de molécules, mais même à l'intérieur d'une petite famille comme e.g. celle des retardateurs de flamme poly-brominés on trouve des molécules très différentes en termes de caractéristiques physico-chimiques ;
- la forme sous laquelle une molécule appartenant aux CTO est présente dans le sol (neutre, ionique, polarisée) (1) dépend de ce sol ; (2) est peu connu/prédictible ; (3) est souvent multiple ; (4) peut varier au cours du temps ; (5) influence fortement son devenir ;
- Les CTO sont apportés dans une matrice elle aussi organique. Celle-ci affecte à la fois le comportement des CTO et les propriétés du milieu récepteur, au moins à l'échelle temporelle qui est aussi celle de la dynamique de la plupart des CTO. L'analyse de risque fait pour l'heure abstraction de cette matrice.

¹² <http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC23785> ;
<https://echa.europa.eu/guidance-documents/guidance-on-reach>

Admettant ces approximations et besoins de recherches futures, nous avons pu établir les gammes de possibles pour les divers taux (A-5). Bien que ces résultats indiquent qu'il y aurait peu de raisons de s'inquiéter de l'accumulation dans le sol dans les scénarios donnés (Figure II.20), ils indiquent également que les conclusions pourraient changer considérablement lorsqu'on envisageait d'autres scénarios d'utilisation d'engrais à base de boues ou de lisier, en particulier en maraîchage à cycle court.

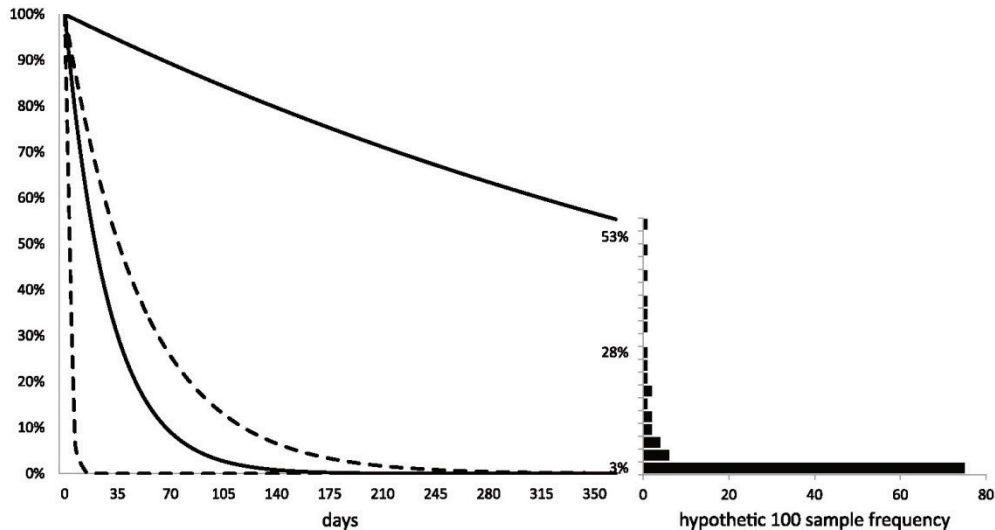


Figure II.20 Interpretation of upper and lower bounds based removal dynamics. Solid lines indicate high and low k TCPP dynamics, recalcitrant when compared, for instance, to nonylphenol (dashed lines). The histogram on the right indicates the frequency distribution that would be obtained between these high and low removal limits from a hundred samples after 1 year if the k distribution would be uniform. (A-5)

Il en va de même pour l'assimilation par les cultures en ce qui concerne la proportionnalité prédite et rapportée avec les concentrations du sol. L'interprétation du « risque » de lixiviation de CTO est beaucoup moins nette, car : (1) l'incertitude est telle qu'aucune quantification significative ne peut être produite pour le moment ; (2) la lixiviation ne peut pas être significativement liée à la contamination des eaux souterraines dans nos conditions hydrogéologiques ; et (3) les acteurs concernés ne disposent pas encore de valeurs de référence pour l'interprétation.

Bien que nous ne l'ayons pas encore réalisé, il convient d'observer que ces derniers modèles, autant celui portant sur les ETM que celui du devenir des CTO, peuvent aisément être intégré au sein d'un modèle dynamique comme UPUTUC. Cela permettrait : (1) de lier les teneurs dans les fertilisants aux matières premières et aux processus ayant lieu lors des procédés de « fabrication » et de stockage ; (2) de considérer (la variabilité de) la pratique culturale, dans le temps et dans l'espace, dans l'apport de contaminants ; (3) de considérer les conditions locales, biophysiques et climatiques, dans l'estimation du devenir de cet apport.

E. Conclusion : Le recyclage territorial vu comme écologie industrielle

Le parcours décrit au fil de cette Partie II illustre l'évolution de mon positionnement tel qu'indiqué dans le résumé (I.A). Ce parcours a débouché sur un terrain fertile, que j'ai défriché, mais que je n'ai qu'à peine commencé à exploiter, que je ne suis d'ailleurs pas seul à exploiter, et dont d'autres continueront peut-être de cueillir les fruits après moi. Ce qui m'apparaît comme probable, du simple fait de l'avancement inexorable de mon parcours, mais qui trahit aussi une ambition. Une ambition qui nécessite que je réponde à la question éludée jusqu'ici, que ce soit pour moi-même, mes collègues, nos futurs collaborateurs ou nos éventuels successeurs : Mais où se situe au juste ce terrain dans le paysage disciplinaire de la science ? De quel territoire peut-il bien se réclamer ? Bien que peu disciplinaires par nature, de quoi relèvent ces recherches ? De quel domaine peuvent-elles se réclamer ? A quels travaux peuvent-elles se comparer ?

Ces questions ont dû vous effleurer l'esprit, voire vous sauter aux yeux. Et les critiques et réflexions distillés au fil des pages constituent des éléments qui, en s'accumulant en cours de route, ont commencé à constituer à mes propres yeux un faisceau d'indices convergeant vers la réponse : l'hybridation du positivisme et du constructivisme ; RORAL, lié à, mais en même temps distincts de, l'INRM ; la gestion territoriale, dépassant le seul secteur agricole ; la simulation multi-agents de cette gestion ; la co-conception de solutions exploitant un potentiel de synergies entre secteurs d'activité jusqu'alors « disjoints » ; la finalité d'une forme de « bouclage » de cycles de matières ; les conséquences environnementales, tantôt considérées comme des finalités, tantôt comme externalités...

Je me suis ainsi estimé légitime de me « proclamer » – et à travers moi tout l'unité Recyclage & risques – du champ de l'écologie industrielle, fondé initialement sur l'analogie entre le fonctionnement des écosystèmes naturels et celui souhaité pour le système anthropique, seul champ qui couvre l'ensemble de notre diversité de recherches et avec qui nous partageons les grands traits caractérisant nos objets de recherche tout comme la finalité appliquée d'éco-efficience. « Grands traits », car les contours de ce domaine encore relativement jeune lui-même¹³ ne sont pas encore d'une grande solidité et précision. Il s'agit d'un courant issu d'une démarche d'ingénierie locale (Frosch, 1992)¹⁴, mais théorisé par la suite, tout en le portant à l'échelle globale, par des scientifiques de divers horizons, des sciences de l'ingénieur à la sociologie (écologique). C'est un domaine de ce fait encore traversé de controverses, mais du coup demandeur lui-même d'apports nouveaux et de regards frais. En même temps qu'un champ de recherche interdisciplinaire, aux contours encore malléables, c'est aussi une démarche d'action (Abitbol et al., 2014) – ce qui là aussi nous convient bien – défini cette fois jusque dans la loi : La loi du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte définit l'écologie industrielle et territoriale comme [consistant] « *sur la base d'une quantification des flux de ressources, et notamment des matières, de l'énergie et de l'eau, à optimiser les flux de ces ressources utilisées et produites à l'échelle d'un territoire pertinent, dans le cadre d'actions de coopération, de mutualisation*

¹³ Il est toutefois doté d'une société savante, l'*International Society for Industrial Ecology*, et de journaux dédiés tels *International Journal of Industrial Ecology* ; *Resources, Conservation & Recycling* ; *Journal of Cleaner Production*.

¹⁴ Notez qu'il s'agit d'une certaine manière d'une redécouverte et que l'on pourrait déplacer l'origine de ce champ un siècle en arrière, se référant aux travaux de Patrick Geddes publiés en 1884 (A-4).

et de substitution de ces flux de ressources, limitant ainsi les impacts environnementaux et améliorant la compétitivité économique et l'attractivité des territoires ». Pour le Ministère de la Transition écologique et solidaire, l'écologie industrielle et territoriale « *est l'une des composantes territorialisées de l'économie circulaire. Elle recourt à la composante réduire, réutiliser et recycler de l'économie circulaire et peut aller également vers des démarches d'éco-conception, d'économie de la fonctionnalité ou de développement volontaire de filières locales* ». Le passage à l'action, c'est-à-dire la mise en place de synergies et de mutualisations entre plusieurs acteurs économiques, devrait être rendu possible grâce aux connaissances produites, qui constituent un levier fort de prise de conscience, mais aussi par l'accompagnement des acteurs, leur mise en réseau, et l'animation des démarches. Une vision compatible avec nos travaux (section II.D).

Le domaine de recherche correspondant s'est structuré en un ensemble de composantes dont certaines correspondent peu ou prou à des disciplines traditionnelles (e.g. des sociologues et économistes étudiant le « métabolisme socio-économique », des géographes s'intéressant au « métabolisme urbain »), là où d'autres partent de produits ou de filières, isolés de leur contexte industriel et territorial (e.g. l'éco-conception, l'ACV de la durabilité). Celle qui parmi ces composantes s'attache à traduire les théories de l'écologie industrielle en pratique, faisant ainsi le lien avec le domaine d'action décrit ci-dessus, est dénommée *symbiose industrielle*. Marian Chertow le définissait ainsi : « *the part of industrial ecology known as industrial symbiosis engages traditionally separate entities in a collective approach to competitive advantage involving physical exchange of materials, energy, water, and by-products. The keys to industrial symbiosis are collaboration and the synergistic possibilities offered by geographic proximity.* » (Chertow, 2000). Tout comme les termes écologie et métabolisme, symbiose est ici considérée comme une analogie avec la symbiose entre organismes biologiques dans la « nature ».

Dans les publications résumées dans la section II.D.1, nous ne nous réclamions pas encore de la symbiose industrielle, bien que la démarche de co-construction que nous y présentons corresponde plus particulièrement à ce qui est dénommé « symbiose industrielle facilitée » en écologie industrielle (Paquin and Howard-Grenville, 2009, 2012). Mais afin d'aller au-delà de cette appartenance autoproclamée, les principales publications de la section II.D.2 ont été publiées dans une revue de l'écologie industrielle, ou lues par cette communauté, postulant explicitement qu'elles constituent des contributions au domaine de la symbiose industrielle. Le recyclage territorial des résidus organiques y est ainsi décliné comme un cas d'application particulier de symbiose industrielle, ou de symbiose « territoriale » pour les publications en français (A-1 ; A-5 ; A-7 ; O-2 ; O-3 ; O-6).

L'essaimage académique en France ne date en fait que d'une dizaine d'année, quand l'ANR a lancé (en 2007) deux Ateliers de Réflexion Prospective (ARP) sur les écotechnologies en soutien au programme PRECODD (Programme de Recherche sur les Ecotechnologies et le Développement Durable), l'un portant sur l'écologie industrielle (ARPEGE), porté par le Centre de Recherches et d'Etudes Interdisciplinaires sur le Développement Durable (CREIDD) de l'Université Technologique de Troyes. Les principaux animateurs d'ARPEGE, Nicolas Buclet, économiste, et Sabine Barles, géographe, y ont fondé un courant français d'*écologie territoriale* – terme que Pierre Calame avait employé dès le début des années 2000 (Calame, 2009) – qui entretient depuis lors une légère tension, voire revendique une particularité plus ou moins assumée, par rapport à l'écologie industrielle de la communauté internationale, qui ignore quant à elle pour l'heure son existence. Cette particularité tient principalement de l'échelle spatiale considérée, comme l'indique le Commissariat Général au

Développement Durable quand il observe que « *l'intérêt d'une écologie territoriale repose sur le fait que le territoire apparaît aujourd'hui clairement comme la bonne échelle de réflexion écosystémique entre milieux et sociétés humaines, tout en mettant en avant le caractère multiscalair* » (Abitbol et al., 2014). Dès lors qu'elle s'inscrit dans un cadre d'action, comme dans le cas de « *l'écologie industrielle et territoriale* »¹⁵ promue par les autorités françaises comme indiqué ci-dessus, l'écologie territoriale est de fait proche de ce qui ailleurs est désigné par symbiose industrielle.

Bien que dominé en France depuis ses débuts par les sciences humaines et sociales, cet atelier initial proposait des éléments dans sa définition, de ce qui s'y appelait encore l'écologie industrielle, appelant à la considérer comme *plus* qu'une analogie de l'écologie. Ainsi le rapport de l'ARP ARPEGE stipule que :

*« L'écologie industrielle porte une attention particulière à l'analyse des échanges **entre les sociétés et la nature** et à la circulation des matières et de l'énergie qui les caractérisent, ou qui caractérisent les sociétés industrielles elles-mêmes. Ces flux sont analysés d'un point de vue quantitatif (métabolisme industriel) **voire naturaliste**, mais aussi d'un point de vue économique et social, dans une perspective systémique. »*

Or, comme ailleurs, ces protagonistes français comme Sabine Barles conçoivent le métabolisme territorial, objet de recherche de l'écologie territoriale¹⁶, comme une analogie avec le fonctionnement d'un organisme. Mes travaux soulignent que l'agriculture compte parmi les principaux domaines « d'échange entre les sociétés et la nature », que l'agriculture bénéficierait de – et devrait être considérée par – des démarches de symbiose industrielle. Mais aussi que son inclusion dans un cadre dichotomique société – nature serait pour le moins délicat et que la conception du métabolisme comme analogie serait inopérante dans un territoire agricole !

L'acceptation au sein de l'écologie industrielle de nos recherches en recyclage territorial de résidus organiques n'est pas tout à fait acquise – ce « lobbying » n'en est qu'à ses débuts – et nous apporte moins de réponses qu'elle nous pose de questions. Mais c'est ce qui fait avancer la recherche, et il importe de militer pour une telle inclusion, que ce soit du point de vue académique ou de celui du développement. Une ambition qui conduit à un challenge : obtenir la concession de l'abandon de l'analogie, ou du moins de l'exigence de son respect. C'est cela qui m'a incité à produire une argumentation démontrant :

- que rien – ni les définitions ni les principes de l'écologie industrielle – n'impose sa conception comme une analogie
- que cette analogie est mal posée et en décalage avec l'écologie moderne : Parce que l'analogie devrait concerner l'écosystème, mais se réfère à l'organisme individuel ; parce que l'utilisation du terme métabolisme n'est pas originaire ni réservé au domaine de la physiologie ; parce que le métabolisme biologique n'est pas toujours et pour toutes les matières « efficient » ; parce

¹⁵ Abitbol et al., 2014 : La quantification des flux de ressources (matière, eau, énergie) et l'optimisation de leur utilisation dans le cadre d'actions coopératives territorialisées et innovantes. L'écologie industrielle et territoriale prend en compte tous les flux nécessaires au fonctionnement socio-économique des territoires et cherche à les quantifier en unité physique avec l'objectif de démultiplier les opportunités de coopération entre acteurs du territoire afin d'intégrer de la transversalité entre les différentes fonctions territoriales.

¹⁶ L'analyse du fonctionnement des territoires au prisme de ses consommations d'énergie et de matières et de leur circulation au sein de celui-ci.

que celui-ci n'est pas toujours basé sur l'autonomie par rapport à son environnement ; parce que l'écologie combat depuis Tansley, donc pas loin d'un siècle, le paradigme de la succession, menant selon Frederic Clements (1874–1945) à la maturité, au climax. Si l'écologie industrielle se veut une analogie, cette analogie devrait concerner le paradigme actuel de la co-évolution ;

- que l'acceptation de toute référence au métabolisme comme une référence à un segment particulier du métabolisme (ou réseau métabolique) de la biosphère, et par conséquent acceptée comme une réalité, fournit un cadre bien posé et utile à l'écologie industrielle

J'estime que la réussite même de ce projet de publication (A-4) signifie l'obtention de la concession sollicitée. Mais bien que j'y propose une définition du métabolisme et en déduis une proposition de définition du métabolisme industrielle¹⁷, il me reste encore à en apprécier et assumer pleinement les conséquences, tant dans l'absolue qu'en termes de notre domaine d'application spécifique de recyclage territorial de résidus organiques. C'est l'objet de la section suivante.

¹⁷ Mon analyse induit une définition générale du métabolisme qui se tient en quatre mots : « biologically mediated matter change ». Au sein de cela, « human mediated matter change for the maintenance and enjoyment of human life » désigne ce qui est appelé le métabolisme sociale, mettant les termes courant comme métabolisme socioenvironnemental ou métabolisme socioécologique de côté comme logiquement incorrect. Le métabolisme industriel est à son tour à considérer comme désignant un sous-ensemble, du métabolisme sociale cette fois, défini comme « human mediated matter change for sustaining a productive system's economic activity » (A-4). Pour le terme exclusivement français de métabolisme territorial on obtiendrait ainsi une définition en remplaçant dans ce qui précède le mot « productive » par « territorial ».

III. Perspectives de recherche

Avertissement :

La section II.D annonçait la couleur : en ajoutant le constructivisme au positivisme, chacun instrumental dans des travaux différents, je n'adhère à aucun de ces courants de manière totale et par conviction. Ainsi, sans exclure aucunement que mon objet de recherche existe indépendamment de moi, j'admets que « le chercheur construit l'objet de son étude dès lors qu'il l'approche », au moins pour partie, et que « cette construction dépend de présupposés qu'il fait sur celui-ci » (Encadré II-1). La dichotomie Nature – Société par exemple, si profondément ancré dans la science « appliquée », constitue un présupposé fort structurant de l'écologie industrielle.

En l'admettant, je consens aussi qu'au lieu de prendre valeur de vérité, la connaissance scientifique « constitue des modèles satisfaisants de représentations du monde dans des contextes et par rapport à des projets conçus ». Mais cela ne se décrète pas : cela implique une obligation de vérification et possiblement de (re-)construction ! La conception défendue de l'environnement (II.D.2.a) et de celui du métabolisme industriel (II.E) remettent en cause le bien-fondé de présupposés. Mais il en résulte une obligation de construction, qui n'est pour le premier pas achevée et n'a pour le second même pas été initiée. Cela constitue donc l'objet du projet scientifique à esquisser dans la présente partie.

Mais, contrairement à l'usage, il m'est impossible de passer directement à la présentation de ce projet. Car la vérification elle-même reste inachevée. Il me faut donc pousser l'analyse jusqu'au bout afin de savoir en quoi précisément les modèles ne constituent pas cette représentation satisfaisante du monde. Quand j'aurai ces clés là, je pourrai commencer à construire sur des bases vraiment saines. A commencer par l'adoption d'une posture constituant un point de départ utile et lisible remplaçant le « à la fois positiviste et constructiviste », ou ni l'un ni l'autre.

Cette analyse a abouti au texte ci-après qui, malgré mes tentatives de le maîtriser, doit paraître long et fastidieux aux yeux de certains. J'en appelle à votre indulgence, car une telle analyse, on ne le fait qu'une fois. N'en déduisez pas non plus une quelconque prétention en matière d'épistémologie ou de philosophie des sciences : ce n'est là juste un chercheur qui essaie honnêtement de s'interroger sur ce qu'il fait quand il fait ce qu'il fait (ou fera). Et la visée est purement instrumentale, car ce texte se veut utile au progrès des domaines de recherche auxquels je tente de contribuer (section III.A.2 b, c et d), utile au cadrage de mon objet (section III.B.1) et utile à penser le rapprochement/l'intégration au sein du collectif de notre unité Recyclage & risque (section III.B.2.b).

A. Le choix d'une posture épistémologique pour la symbiose industrielle et son évaluation environnementale

Mes travaux récents apportent un certain nombre de pierres à l'édifice de l'approche que je me donne pour objectif de continuer à développer et de mettre en œuvre. Une ambition qui, vous l'aurez compris des sections précédentes, résulte du fait de ne pas avoir trouvé un abri méthodologique existant convenable. Ce sera finalement sans doute une sorte de *Sagrada Familia* : chose évolutive dans l'esprit de la gestion adaptative qu'elle cherche à servir, dont je ne sais pas si je pourrai – ou dois même chercher à – la parachever un jour, mais l'édifice remplira son office bien avant. A condition toutefois de le pourvoir d'une fondation solide. Les éléments désormais assemblés, et testés dans des applications, jettent une base logique. Il manque la posture épistémologique dont proviennent ces éléments et que je propose comme cadre de mes travaux futurs.

Avant de vous amener au terrain de mon choix, je vais donc tout d'abord vous présenter les éléments de justification qui m'amènent à quitter ce terrain pourtant si prisé de la Nature – Société. Une justification qui tient du puissant concept d'Anthropocène. Parti des sciences de la terre, une communauté globale composée d'environnementalistes, de politiciens, d'artistes, d'activistes, d'écrivains, d'historiens constitue désormais une « génération Anthropocène » qui s'en empare et se questionne¹⁸. Or, il me semble que nous sommes nous, chercheurs dans un des domaines les plus directement concernés, loin d'avoir tirés tous les enseignements de ce concept. Contribuer au mieux aux grands changements de notre époque pourrait bien nécessiter de revisiter certains éléments fondamentaux de nos pratiques et de nos conceptions. La présente est une modeste tentative en ce sens, portant sur mon champ spécifique, qui a vocation à être débattu. Un travail sur la conscience épistémique (Figure III.1) et sur la conscience des implications de la réification que Ray Ison appelle de ses vœux (Ison, 2016).

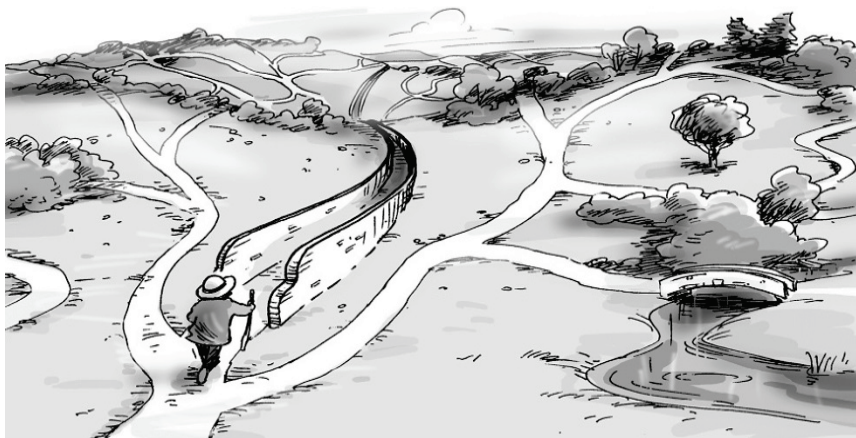


Figure III.1 Framing choices create initial starting conditions that become conserved as lineages (pathway dependencies). What does a framing choice reveal or conceal? What are its theoretical entailments? (reproduit de la présentation de R. Ison au séminaire NSS-Dialogues, 12 juin 2017)

¹⁸ Robert Macfarlane, The Guardian, le 1 avril 2016 :

<http://www.theguardian.com/books/2016/apr/01/generation-anthropocene-altered-planet-for-ever>, et le 15 juin 2017 : <https://www.theguardian.com/world/2017/jun/15/timothy-morton-anthropocene-philosopher>

1. Eviter l'inévitable dichotomie Nature – Société

Vaste sujet qu'indique ce titre, que l'on peut considérer sous un grand nombre d'angles divers. Et un des débats les plus anciens. Je n'ai pas la prétention d'apporter une pierre à cet énorme édifice, mais le fait est que la problématique qui se présente à moi (section II.E) impose une prise de position : la dichotomie Société – Nature est une structure fondamentale de notre façon – au moins de nous occidentaux – de penser le monde, de notre *cosmologie* (Descola, 2011). Elle s'immisce de ce fait partout, y compris dans le discours et les méthodes scientifiques où on la retrouve dans la structuration disciplinaire et sous de nombreux vocables communs dans le champ qui est le mien tel service écologique versus impact environnemental ou Anthroposphère versus Environnement. Justement : « Environnement »...

Que ce soit l'écologie territoriale ou l'évaluation environnementale, les deux composantes de ce qui est et sera mon terrain de jeu, mon champ de recherches, renvoient à la dichotomie. Plus ou moins consciemment elles sont fondées dessus, et plus ou moins consciemment ai-je dans mes travaux jusqu'ici évité l'écueil que constitue le questionnement de ce modèle de pensée si ancré.

Tout comme ailleurs, la position conventionnelle, dominante, voire hégémonique dans le domaine de l'écologie industrielle consiste à adopter cette dichotomie. Mais les descriptions évasives, des choix pas toujours cohérents et l'absence de tentatives de définition rigoureuses suggèrent qu'il s'agit là d'une adoption « par défaut », contrairement à un choix conscient d'une telle adoption comme cadre pertinent de travail. Et il est clair que la manière dont je pense pertinent de concevoir l'environnement dans le cadre de la symbiose industrielle (section II.D.2 ; A-1) et dans le cadre de la co-gestion adaptative à l'échelle du territoire (section II.D.1 ; AS-1) ne s'appuie pas sur cette dichotomie. Il me paraissait donc nécessaire et utile de chercher à savoir si, où et comment exactement cette dichotomie s'impose à moi : là où elle ne s'impose pas il me va bien falloir identifier une façon alternative de procéder !

Pour ce qui est du cœur scientifique, de l'analyse et de la représentation des flux de matières, mon analyse m'a conduit à qualifier la dichotomie inutile voire même contreproductive. Je ne suis pas du tout seul en cela. La division entre les royaumes social et naturel a été contestée des deux côtés de la séparation épistémique (e.g. Haila, 2000, dans Carolan, 2005). La distinction entre objets naturels, techniques et culturels est progressivement remise en question, que ce soit en écologie (Lévêque, 2013), en anthropologie (Descola, 2011), en sociologie (Latour, 2015), voire même en économie (Costanza et al., 1997), avec des appels jusqu'à dans la revue pourtant intitulée *Nature* (Seitzinger, 2010). Comme le disait Moscovici (1972) déjà de manière radicale : « Rien ne nous oblige à prolonger la confusion ; tout nous incite à mettre fin à la vision d'une nature non humaine et d'un homme non naturel ». Une vision reprise par la « génération Anthropocène » gagnée par l'idée que le principal obstacle à la pensée environnementale est l'image de la nature elle-même, qu'avoir une vision proprement écologique nécessite d'abandonner l'idée de la nature une fois pour toutes (Morton, 2009).

J'ai identifié six raisons à mon opposition à la position dominante que reste malgré tout cette dichotomie. Si l'argumentaire peut paraître quelque peu disproportionné, je vous prie de le juger à l'aune de l'emprise ancienne et profonde de la dichotomie sur notre – science incluse – vision du monde.

Raison 1 : La dichotomie ne peut constituer une ontologie pour la recherche du fait de l'absence de définition des domaines et de leur limite

Prise pour une évidence auto explicative, la dichotomie et les parties qui la composent ne font jamais l'objet de tentatives de définition. Or, nous savons fort bien, comme le relève par exemple Carolan (2005), que le sens de « nature » n'est nullement stabilisé, même au sein d'une discipline scientifique. Nature est un concept terriblement imprécis. Raymond Williams en disait même que c'est « probablement le mot le plus complexe de la langue » (1983, 184) et appelait à porter une attention particulière à son emploi. Chose que John Stuart Mill relevait déjà de manière fort bien dans son œuvre « La Nature » (1874). Le flou entourant cette fausse évidence me semble incompatible avec son emploi comme concept structurant pour la science. Car c'est surtout dans le discours scientifique que nous devrions chercher à respecter le principe de Locke, philosophe des Lumières (dans Berlin, 1956) :

Before a man makes any proposition, he is supposed to understand the terms he uses in it, or else he talks like a parrot, only making a noise by imitation, and framing certain sounds which he has learned from others; but not as a rational creature, using them for signs of ideas which he has in his mind. The hearer also is supposed to understand the terms as the speaker uses them.

Un principe évident qu'aucun scientifique ne contestera. Mais si au moins jusqu'au début du 20^e siècle la littérature scientifique contient des appels à la définition répétée et revisitée de concepts clé (comme indiqué pour le terme métabolisme dans A-4), cette pratique me semble perdre pied au fur et à mesure que les objets de recherche deviennent plus complexes¹⁹. Ce n'est là sans doute que la réflexion du flou dans lequel opèrent les acteurs du monde, la « société », avec laquelle la science – et en particulier celle produite au Cirad – est si fortement imbriquée comme le décrit fort bien Bruno Latour dans « Nous n'avons jamais été modernes » (1993). Or, si la science doit être en capacité de dialoguer à ces interfaces et donc y adapter son discours à la situation « amoderne », il conviendrait de se prémunir contre une infiltration inconsidérée de cette adaptation dans ses compartiments internes. Sinon il se passe ce que je crains déjà observer ; que les perroquets de Locke commencent à constituer une espèce envahissante dans notre milieu. Comme je pense l'avoir démontré pour les termes essentiels à ma propre activité que sont métabolisme (A-4) et environnement (A-1), rigoureusement déduire une définition à adopter permet d'y voir plus clair au point que les pistes à suivre s'en dégagent. De telles réflexions me semblent particulièrement bienvenues concernant les multiples dichotomies courantes dans le discours scientifique, car elles me semblent souvent amenées à devoir observer que le travail de « purification » (Latour, 1993) est loin d'évident, possiblement contre-productif car réducteur, et qu'une certaine reconnaissance d'une réalité hybride peut au contraire être très fertile. Dans le champ qui est le mien il en va à mon sens ainsi de plusieurs dichotomies à travers lesquels nous représentons la réalité : analytique – systémique, biophysique – gestion, et même organique – minéral. On observe assez vite que la limite n'est pas si aisée à placer qu'il ne le paraît à première vue. Mais nature – société est la dichotomie qui constitue la véritable

¹⁹ Mon collègue Jacques Tassin s'en émeut aussi dans un entretien au Monde : « Je crois qu'on ne prête pas assez attention aux mots qu'on utilise dans le langage de la vulgarisation scientifique. Camus disait que mal nommer les choses, c'était ajouter au malheur du monde. » (Le Monde, 16 février 2014). Et dans ses présentations dans le cadre du collectif *Nature, Science et Société*, Ray Ison relève « a lack of awareness of the implications of living in language » comme constituant un « transformational challenge to overcome systemic failure in doing what we do » (Ison, 2016 ; communication orale, juin 2017).

fondation de ce champ, ainsi que de beaucoup d'autres, et où en même temps les domaines respectifs, et donc leur limite, sont le moins souvent définis – ou le moins définissable ?

Prenons l'exemple de cet ouvrage fondamental de l'écologie industrielle, le *guide pratique de l'analyse de flux de matières* (Brunner et Rechberger, 2004 [soulignages de ma part]) :

The human sphere of life — a complex system of energy, material, and information flows in space — is called the “anthroposphere.” It is part of planet Earth and contains all processes that are driven by mankind. ... The complementary part to the anthroposphere is designated as the environment. The anthroposphere interacts with the environment via extraction of resources (air, water, and minerals) and emission of off-products and wastes. The anthroposphere can be defined as part of any region where human activities take place. ...

All along the anthropogenic process chain there is exchange of materials and energy with the environment, which comprises four compartments: atmosphere, hydrosphere, pedosphere, and lithosphere. Often, terms such as water, air, and soil (for pedosphere) are used synonymously. Some authors use the terms technosphere or biosphere instead of anthroposphere.

*Sometimes the interface between anthroposphere and environment is not clear. For example, a soil that is used by humans can be regarded as a part of the anthroposphere as well as of the environment. Hence, the definition of the anthroposphere is somewhat subjective. Some authors claim that all soils belong to the anthroposphere because anthropogenic trace substances have been detected in all soils on Earth; there are no soils anymore that are in a natural, uninfluenced state, and thus they do not belong to the environment anymore. Other authors include only those soils in the anthroposphere that are actively managed by mankind. **In MFA practice, such allocation problems are of little relevance.** They should be acknowledged but not overemphasized.*

“Of little relevance” ! Pourquoi donc le mentionner, et le traiter de manière somme toute peu satisfaisante ? Juste parce qu'on constate que la distinction est peu opérationnelle ? Pourquoi se réclamer de l'Anthroposphère si dans les 150 pages qui suivent ils ne font plus du tout référence à cette dichotomie ? Si l'analyse des flux de matières peut vivre sans, sert-elle ailleurs ?

Tout simplement, je suspecte, parce que la dichotomie est tellement incrustée dans notre vision du monde qu'elle va de soi. Ce n'est pas une conception dont on évalue l'utilité dans un cadre particulier. Non, c'est une idée « absolue » que l'on pense voir sous tout ce que l'on observe. Or, comme l'indique la citation – à laquelle on peut aisément en ajouter de nombreuses autres – son introduction dans la science pour répartir les objets de recherche ne va nullement de soi ! Latour (2015) parle de « *l'abîme qui sépare, d'un côté, le principe de sens commun que l'on peut facilement distinguer les objets du monde naturel et les sujets du monde humain, et, de l'autre, l'extrême difficulté pratique à le faire* ». Pour lui, « *croire que les termes nature et société (culture) décrivent quoi que ce soit du monde réel revient à prendre une abstraction pour une description. ... Partout où l'on avait affaire à un phénomène « naturel », sur terre, on rencontre l'« Anthropos » et partout où l'on s'attache aux pas de l'humain, on découvre des modes de relation aux choses qui avaient été auparavant situées dans le champ de la nature* ».

Et en cherchant la limite on est amené à la placer au moins autant voire plus dans le temps que dans l'espace. Et si la limite marquant le début de l'Anthropocène est traitée comme une question géologique (Latour, 2015 ; le groupe de travail correspondant de l'Union Internationale des Sciences Géologiques <http://quaternary.stratigraphy.org/workinggroups/anthropocene/>), son équivalent écologique pourrait être placé bien en amont dans le temps. Monbiot (2014), journaliste et zoologue, donne divers exemples éloquentes concernant l'influence majeure – mais ancienne – de l'homme sur des écosystèmes que tout un chacun serait tenté de désigner comme étant les plus naturels qui soient. Et ses exemples ne concernent que l'impact à travers les animaux de formes supérieures – espèces clé dans les cascades trophiques – en les introduisant ou en les éliminant. Cela va de la transformation des prairies des steppes de Béringie en toundra moussue voici 15 mille ans, par l'élimination des mammoths, des bœufs musqués, des bisons et des chevaux, à la différence entre les forêts européennes d'avant et d'après la dernière glaciation, due à l'élimination entre temps des éléphants et rhinocéros qui y vivaient avant. Et partant de là nous continuons de voir dans l'espace qui nous entoure de la « nature » où cette influence est pourtant bien plus évidente et récente, par le truchement de ce que Pauly (1995) appelait le *shifting baseline syndrome* : il dénonçait la mauvaise gestion des écosystèmes (marins) comme étant le résultat de la mesure de leur changement par des chercheurs utilisant leurs souvenirs personnels du passé, forcément récent, comme référence. C'est par ce biais-là que nous arrivons à qualifier des paysages de prairie comme « naturel » – et cela des prairies galloises sur-pâturées et dépourvues d'oiseaux de Monbiot à celles de la Nouvelle Zélande en passant par nos alpages. A Monbiot (2014) de citer diverses politiques à caractère environnemental qui s'appuient sur de telles bases mouvantes, comme par exemple certaines mesures agro-environnementales de la Politique Agricole Commune prônant le maintien de pâturages « permanents », limitant le nombre d'arbres que ceux-ci ont le droit de contenir, proclamant au passage que l'abandon de ces prairies aurait « des conséquences environnementales négatives »²⁰. Ce qui est désigné comme « nature » n'a donc souvent rien de particulièrement *pristine* : de primitif et d'original. Un choix comme un autre, sauf qu'il n'existe aucune règle – ni même une réflexion – sur où placer la limite, que ce soit cette référence dans le temps ou un « degré » de modification qui resterait à qualifier, rendant par conséquent l'identification d'une limite spatiale illusoire. Si cela ne pose pas de problème à la politique, une distinction aussi subjective constitue un handicap majeur pour une utilisation rigoureuse de la dichotomie dans la recherche.

Raison 2 : La structuration dichotomique a priori ne respecte pas le principe de la recherche systémique

Reflétant cette vision du monde dont il estime dépendre, la dichotomie continue donc de structurer le domaine de l'évaluation « environnementale » où la fin – l'aide à la décision – justifierait les moyens. Mais cela m'amène à une seconde raison : fonder la recherche sur la dichotomie, ou l'introduire de manière précoce dans l'analyse, risque de nuire à la compréhension d'une situation complexe dont on chercherait justement à étudier et respecter les propriétés supposées systémiques. Comme le dit Maris (2010) :

La dichotomie entre nature et culture, comme toute dichotomie, s'opère en deux mouvements : la séparation et l'homogénéisation. D'une part on polarise les objets en

²⁰ European Commission, 2011: Common Agricultural Policy towards 2020: Assessment of Alternative Policy Options, http://ec.europa.eu/agriculture/policy-perspectives/impact-assessment/cap-towards-2020/index_en.htm

deux classes selon qu'ils relèvent de l'un ou de l'autre des membres de la dichotomie ; d'autre part, à l'intérieur de chacune de ces classes, on nivelle les différences entre les objets pour insister sur ce qu'ils ont en commun. ... Il y a donc un gradient plus qu'une dichotomie entre nature et culture, selon l'influence relative des activités humaines et des processus naturels.

Dans le domaine de l'anthropologie Descola (2011) critique de manière similaire des analyses « *qui n'ont retenu de l'anthropologie structurale qu'un procédé d'une attractive simplicité, ceux qui y ont recours se croient déliés de l'obligation de rendre compte de la complexité du réel dès lors qu'ils ont distribué objets, personnes, attributs et relations dans un tableau à deux colonnes. La dichotomie devient alors substantive et empêche toute appréhension fine de la matière...* ». Jollivet (2009) le formule de manière plus générale – et fort pertinente par rapport à l'objet de recherche qu'est le mien : « *... la dualité nature/société ... a un effet pervers chaque fois que l'objet de la recherche résulte, dans sa constitution propre, d'une interférence entre des phénomènes mettant en jeu des « éléments » dont les « comportements » sont d'ordre naturel et d'autres dont les « comportements » sont régis par des rapports sociaux, au sens large du terme* », parlant plus loin d'un « *double désajustement, dû à deux projections de sens contraires, mais qui ne se rencontrent pas* ».

Latour (2015) en est récemment venu à prendre la défense de la théorie de Gaïa de James Lovelock :

C'est de cette généralisation induite que provient cette étrange opération qui a permis de désanimer une section du monde, déclarée objective et inerte, et de suranimer une autre section, déclarée subjective, consciente et libre. C'est cette distribution étrange - ce que Whitehead a nommé bifurcation de la nature - qui pèse sur toute l'interprétation de la théorie de Gaïa. ... Gaïa au contraire est composée d'agents qui ne sont ni dés-animés ni sur-animés. ... Tout ce qui était un simple intermédiaire servant à transporter une étroite concaténation de causes et de conséquences devient un médiateur ajoutant son grain de sel au récit.

Sa lecture de cette théorie lui sert comme véritable alternative lui permettant de se libérer du carcan de la dichotomie, et se prêtant du coup a priori mieux à l'étude systémique :

Contrairement à ce que prétendent les détracteurs de Lovelock, Gaïa est constitué d'agents qui ne sont pas prématurément unifiés dans une seule totalité agissante. Gaïa, c'est l'antisystème [nb: au sens de système technique]. Cela relie Lovelock à la tradition de Tansley pour qui le suivi systématique des connexions n'implique aucun holisme. ... C'est la "nature" qui était universelle, stratifiée, indiscutable, systématique, désanimée, globale et indifférente à notre destin. Mais pas Gaïa, qui n'est que le nom proposé pour toutes les conséquences entremêlées et imprévisibles des puissances d'agir dont chacune poursuit son propre intérêt en manipulant son propre environnement. ... A proprement parler, pour Lovelock et encore plus clairement pour Lynn Margulis, il n'existe plus d'environnement auquel on pourrait s'adapter. Puisque tous les agents vivants suivent leurs intentions tout au long en modifiant leurs voisins autant que possible, il est impossible de discerner quel est l'environnement auquel l'organisme s'adapte et quel est le point où son action commence. ... Mais, attention, si cela forme un processus « unique et indivisible » cela ne s'applique pas aux résultats [nb: cf. les propriétés dites émergentes en recherche systémique].

Cela a le mérite de rendre explicite ce qui est implicite dans le rejet de la dichotomie, de montrer qu'une autre conceptualisation, en phase avec l'écologie systémique, est bien possible. Mais cela ne fournit aucune « prise » pour la recherche qui vise à identifier les intérêts et les conséquences des possibles « manipulations de leur environnement » par un ensemble de « puissances d'agir » auquel elle est affiliée.

Raison 3 : Tant qu'on continue de s'y référer, on n'arrivera pas à dépasser la dichotomie

Il y a une troisième raison, plus profonde, qui m'amène à qualifier la dichotomie inopérante voire contre-productive : sans rejet radical, la recherche semble avoir bien du mal à sortir de l'impasse dans laquelle la dichotomie l'a conduite. On produit nombre de contorsions qui me semblent être plus des rustines que des solutions aux limitations constatées. Prenons l'exemple de Carolan (2005) : il critique les heuristiques conceptuelles proposées par ses collègues en « sociologie environnementale » pour traiter les relations nature-société. Une de ses critiques est que celles-ci seraient des « illusions épistémiques » (Bhaskar, 1997), i.e. prenant la connaissance de ce qui est (une déclaration épistémique) pour ce qui est (une déclaration ontologique)²¹. Mais je ne suis nullement convaincu qu'avec son intention affichée de « ramener la nature dans la sociologie », en proposant son propre cadre conceptuel pour l'étude des « relations nature-société », il ne commette pas lui-même cette même erreur épistémique dans le sens où cela suppose une capacité à circonscrire une « nature » et une « société » comme préalable à l'étude de leurs relations...

Et ce n'est là qu'une goutte dans un fleuve dont le débit croît à vue d'œil ! Schoon et van der Leeuw (2015) relèvent l'évolution du nombre de citations du terme « système socio-écologique » dans la littérature scientifique : 30 en 1970, 183 en 1980, 373 en 1990, et plus de 14 000 en 2013... Leur article faisant d'ailleurs partie d'un dossier « à propos des relations natures/sociétés » de la revue *Nature Science Sociétés*. Dans ce même dossier Bassett et Peimer (2015) présentent les cadres théoriques de l'écologie politique dans la littérature anglophone, où ils concluent que « *each of the socioecological frameworks presented are based on the notion that ecology is a social relation. The words "socioecological" and "socioecology" suggest that the status of the ecological is inextricably linked to the status of the social.* » Or, ce *inextricably* n'est nullement assumé par les cadres théoriques présentés qui visent tous l'étude des relations socioécologiques... C'est bien là que je pense voir un problème : la forte augmentation des citations est surtout le fait de travaux défendant ou prétendant être de la recherche intégrée, sans qu'ils y voient la possibilité ou la nécessité d'abandonner la dichotomie fondamentale. On en trouve ainsi tout « naturellement » de nombreux exemples dans une revue comme *Ecology & Society*, dont les éditeurs en chef eux-mêmes sont pourvoyeurs d'expressions pléonastiques comme « *reconnecting to the biosphere* »²² et « *interdependent social-ecological systems* » (Folke et Gunderson, 2012), le dernier étant préféré à – mais correspondant à – écosystème²³. De la même manière, ce qui est dénommé « *sustainability research* » est décrit comme de la recherche qui « *draws on various social and natural science disciplines* »²⁴ focalisant sur les « *interactions between natural and social systems* »²⁵, au lieu de l'étude d'un système complexe

²¹ Ison (2016) observe que l'illusion épistémique est aussi très fréquente pour le terme « système », dont l'utilisation de « système socio-écologique ».

²² voir the Biosphere de Vernadsky (1998) qui en proposant le terme en 1926 militait pour que cela comprenne les humains.

²³ explicitement défini par Tansley (1935) comme incluant les humains.

²⁴ Sustainability Research Institute : <http://www.see.leeds.ac.uk/research/sri/>

²⁵ PNAS : <http://sustainability.pnas.org/>

intégrative. Dans son ouvrage monumental qui vise à promouvoir « l’alphabétisation environnementale dans la science et la société », Roland Scholz (2011) conceptualise la réalité comme composée de « Human-Environment Systems ». Bien qu’il présente le concept comme distinct de celui de système socio-écologique, il s’agit toujours d’une vision de « *coupled, inextricably intertwined, systems* ». Mais comment en attendre autrement de la part de quelqu’un qui dirige le groupe « Interface entre Sciences de la Nature et Science Sociales » du département Sciences de l’Environnement à l’ETH (l’institut fédéral suisse de la technologie) ? C’est là une position qui empêche d’emblée de se libérer de la dichotomie.

Il me semble ainsi s’instaurer une situation où l’on estime faire de la recherche intégrée *parce qu’on* évoque à la fois le social et le naturel, et *puisque* on s’intéresse aux relations (généralement en nombre limité) entre les deux, nul besoin de démontrer que l’on englobe l’ensemble complexe de relations qui constituent la réalité systémique (ce qui nous renvoie à la raison précédente) ... Un seul petit exemple sous la forme de l’intitulé d’une thèse de doctorat INRA dont je reçois l’offre pendant que j’écris ces lignes : « Modélisation multidimensionnelle (environnementale et sociale) des services écosystémiques rendus par ... ». J’estime que la dichotomie a favorisé cette situation où d’emblée le cadre d’interprétation se substitue au cadre d’analyse. Nous sommes si habitués au cadre dichotomique que la seule alternative à « l’homme et la nature » que nous arrivons à imaginer est « l’homme dans la nature » (e.g. Campbell et al., 2009). Mais L’Anthropocène dirige notre attention vers bien plus qu’une « réconciliation » de la nature et de la société en un système plus grand qui serait unifié par l’un ou par l’autre. Pour opérer une telle réconciliation dialectique, il faudrait avoir accepté la ligne de partage entre le social et le naturel²⁶. Cela rappelle ma critique de Fischer-Kowalski et Steinberger (2011) qui dans la sphère de l’écologie industrielle réclament « *a new epistemological paradigm that allows the re-connection of the fields that have become separated by the ‘great divide’* », mais en s’opposant à leur « simple fusion » (dans A-4). Mais comme l’observe Latour (2015) « *l’Anthropocène ne “dépassé” pas ce partage : il le contourne entièrement. Les forces géo-historiques ne sont plus les mêmes que les forces géologiques à partir du moment où elles ont fusionné en de multiples points avec l’action humaine* ». Comme Descola (2011), je crains hélas que tant que *dans* nos appels d’abandon de la dichotomie nous continuons de nous y référer – dans les termes censés donner corps à nos propositions, eh bien ils resteront vains...

Raison 4 : La dichotomie véhicule souvent un cadre moral trop inconsideré voire inapproprié

Une quatrième raison pointe vers un aspect particulièrement fallacieux – et important dans des recherches portant sur l’évaluation environnementale – du maintien de la dichotomie dans le discours scientifique : son maintien se prête particulièrement bien à une entrée subreptive de considérations morales et éthiques dans la pratique scientifique. Car observer les choses telles qu’elles sont « dans la nature » se prête bien à ce que Moore appelait dans *Principia Ethica* (1903) le paralogisme naturaliste, proche de ce qu’on appelle la violation de la loi de Hume (*Traité de la nature humaine*, 1738), aussi appelée guillotine de Hume, qui interdit l’inférence d’un « être » (is) à un « devoir-être » (ought). Ou

²⁶ Ce point est bien illustré par Folke et al. (2016) qui posent d’abord l’existence de systèmes socio-écologiques, ou « socio » correspondrait à *the human dimension in its diverse facets* et écologique au biosphère, pour immédiatement reconnaître la *intertwined nature* de ces deux « ensembles » *that operate as part of the biosphere and as such are dependant on it*. Quel est donc l’intérêt de la distinction, d’autant plus que les auteurs eux-mêmes notent qu’*in the socio-ecological systems perspective the delineation between social and natural systems is artificial and arbitrary* et concluent qu’*it is high time to reconnect approaches to the biosphere foundation* ? Ils terminent par ces mots : « ... hence the need for a biosphere-based sustainability science ». N’aurait-ce pas dû être ça, le terme approprié, évitant la discussion induite par une dichotomie mal posée ?

comme le formule Raymond Boudon (2008) « aucun raisonnement à l'indicatif ne peut engendrer une conclusion à l'impératif ». Mais d'observer que les choses « sont » d'une certaine manière *dans la nature* rend aisée la conclusion que c'est ainsi que les choses « doivent être ». Comme le disait Mill (1874), aucun mot n'est plus communément associé avec le mot « nature » que le mot « loi ». Par ces « appels à la nature » on passe aisément de l'écologie à l'écologisme et à l'environnementalisme. C'est ainsi que les analyses systémiques de « l'impact destructif de l'humanité sur l'environnement », depuis *L'homme et la nature* de George Marsh (1864), s'inscrivant donc dans cette dichotomie, et cela même si elles respectent la loi de Hume (comme ce fut le cas de mes analyses dans l'ouvrage *Livestock's Long Shadow*, O-12), sont interprétées dans un cadre moral particulier (inclusif dans la recherche, comme en témoignent les réactions du milieu agronomique français à cet ouvrage).

Tout comme beaucoup de termes très courants dans le discours environnemental sont de ce fait moralement chargé, comme les mots abandon, amélioration, intendance, sous-pâturage que dénonçait Monbiot (2014), mais aussi sa préconisation à lui-même d'un retour vers un état plus « sauvage » - *rewilding* : les jugements sur le « devoir-être » sont souvent plus explicite qu'implicite ! Et beaucoup de méthodes en évaluation environnementale transgressent allègrement, mais non pas consciemment, la loi de Hume en intégrant une dimension normative. Tout comme l'emploi de métaphores naturalistes en écologie industrielle incite à considérer certaines manières de « être » dans la nature comme modèle, comme façon que les choses « doivent être » dans la *technosphère*. Je ne dénonce pas le fait de violer la loi de Hume, mais le fait de ne pas le justifier : l'abandon de la dichotomie pousserait le chercheur à se positionner et le cas échéant à en faire un choix conscient. Ou dans les mots de Latour (2015) :

Les théologiens ont construit, à travers les siècles, un véritable culte de la Nature, c'est-à-dire la recherche d'une entité extérieure, immuable, universelle et indiscutable, par contraste avec le récit changeant, local, intriqué et discutable que nous autres Terriens habitons. ... Le concept de "nature" apparaît maintenant comme une version tronquée, simplifiée, exagérément moralisante, excessivement polémique, prématurément politique de l'altérité du monde à laquelle nous devons nous ouvrir pour ne pas devenir aliénés.

Pour finir je rappelle l'impossibilité intrinsèque de la maxime « suivre la Nature »²⁷ qui sous-tend une certaine morale induite par la dichotomie, comme déjà fort bien relevé par Mill (1874) :

Let us, then, consider whether we can attach any meaning to the supposed practical maxim of following Nature, in this second sense of the word, in which Nature stands for that which takes place without human intervention. In Nature as thus understood is the spontaneous course of things, when left to themselves, the rule to be followed in endeavouring to adapt things to our use? But it is evident at once that the maxim, taken in this sense, is not merely, as it is in the other sense, superfluous and unmeaning, but palpably absurd and self-contradictory. For while human action cannot help conforming to Nature in the one meaning of the term, the very aim and object of action is to alter and improve Nature in the other meaning. If the natural course of things were perfectly right and satisfactory, to act at all would be a gratuitous meddling, which, as it could not make things better, must make them worse.

²⁷ Mill, 1874 : "Natum sequi was the fundamental principle of morals in many of the most admired schools of philosophy"

Raison 5 : La dichotomie ne renverrait finalement pas à des domaines distincts du réel

Puis il y a une cinquième raison qui relève de la possible remise en question de la base conceptuelle derrière cette dichotomie – et c’est quasiment déjà une prise de position que de l’appeler « conceptuelle » : la vision consistant à voir la « nature » comme le tout biophysique incluant, englobant ou sur lequel se poserait de manière darwinienne la société. Il en va de la nature comme de l’environnement (A-1) : la dichotomie ne renverrait finalement qu’à une relation objet-sujet, où nature joue un rôle de « réalité intermédiaire » (Descola, 2000). Latour (Latour, 2015) argumente de manière convaincante que « nature » est bien plutôt une construction sociale, affectée également par des racines religieuses et une pensée systémique d’origine cybernétique. Selon lui, *« la nature n’existe pas (comme domaine), mais seulement comme la moitié d’un couple défini par un concept unique. Il faut donc prendre l’opposition Nature/Culture comme le foyer de notre attention et plus du tout comme la ressource qui nous permettrait de sortir de nos difficultés ... Si l’écologie affole, ... c’est parce qu’elle oblige à subir de plein fouet l’instabilité de ce concept pris pour l’impossible opposition de deux domaines qui existeraient pour de vrai dans le monde réel »*. Contrairement à un Carolan (2005) qui reconnaît bien des ensembles hybrides entre « domaine biophysique » et « domaine socio-culturel » mais les intitule Nature, nature et « nature », dont deux représenteraient ensemble le social, Latour promeut fortement l’abandon pur et simple du terme « nature »²⁸. C’est bien une réponse claire et pertinente à une désormais ancienne question mal posée concernant la « fin de la nature » (voir *The end of nature*, McKibben (1989), où la nature serait venue à disparaître, l’homme ayant repris son « rôle » de force toute puissante, ce qui renvoie à son rôle de « réalité intermédiaire », et des critiques comme Cronon (1995) et Eckersley (2005), puis, l’homme finissant par disparaître, *The End of the End of Nature* (Szerszynski, 2012)).

Raison 6 : La dichotomie véhicule une vision du monde qui n’est pas forcément comprise ni acceptée de tous

Un sixième et dernier point complète cet argumentaire en faveur, en suivant Latour (2015), d’un véritable abandon de la dichotomie, ou d’une référence précautionneuse à elle. Ce point relève de mon mandat de travail au « Sud » : adopter la dichotomie revient à imposer une conceptualisation du monde qui peut ne pas être en phase avec celle qui prévaut localement. Mais quand on cherche à alimenter dans d’autres cultures un processus de prise de décision avec des estimations « d’impact environnemental » il vaudrait mieux que la base conceptuelle sur laquelle s’appuie la classification sous-jacente à cela soit en phase avec celle-là. C’est une considération anthropologique que Descola (2011) décrivait comme un risque de « eurocentrisme » (voir aussi Moscovici, 1972 sur ce point) :

Nous n’envisageons pas les civilisations non-occidentales comme des systèmes complets de conceptualisation du monde alternatifs au nôtre, mais comme des manières plus ou moins exotiques de rendre compte de l’état du monde que notre propre système de conceptualisation a établi. Faire du dualisme moderne le gabarit de tous les états du monde a donc conduit l’anthropologie à cette forme particulière d’eurocentrisme savant qui consiste à croire, non pas que les réalités que les humains objectivent sont partout identiques, mais que notre manière à nous de les objectiver est universellement partagée.

²⁸ Carolan (2005) s’est bien posé la question : « *Is there any hope of unsnarling this terminological quagmire, or will sociology be forced to abandon the concept entirely in its quest for conceptual and analytic specificity?* ». Mais sans y répondre il n’a à l’évidence pas osé sauter le pas.

Et questionner la pertinence locale de cette base conceptuelle est d'autant plus essentiel qu'elle n'est pas étrangère aux problèmes que nous cherchons à résoudre : L'Occident a fait subir aux écosystèmes des transformations « à la manière naturaliste », c'est-à-dire comme une domestication de la nature sauvage, tandis que dans d'autres cultures (Afrique de l'Ouest, Amazonie, Australie) les transformations graduelles sont plutôt vues comme la co-construction partagée d'un champ d'interaction entre les humains et non-humains de natures très diverses. Le naturalisme occidental en revanche, du fait notamment de la coupure qu'il instaure entre le monde des humains et celui des non-humains, a traité la nature comme un champ d'expérimentation et un gisement inépuisable de ressources, avec les conséquences que l'on sait. Pour finir avec Latour (2015) :

C'est seulement si nous nous plaçons à l'intérieur de ce que William James appelait le multi-vers que nous pourrions alors reconnaître comme un arrangement particulier le choix des existants et de leurs manières de se connecter que nous appelons Nature/Culture qui a servi longtemps – du moins dans la tradition occidentale – à formater notre compréhension collective. ... L'écologie, on l'aura compris, n'est pas l'irruption de la nature dans l'espace public, mais la fin de la "nature" comme concept permettant de résumer nos rapports au monde et de la pacifier. ... On ne comprend rien aux questions écologiques, si nous n'acceptons pas d'être divisés à leur propos. Pour résister au désir de vider l'écologie de sa politique, nous devons suspendre ces visions unanimes, universelles et globales. ... Si nous voulons avoir une écologie politique, nous devons d'abord admettre la division d'une espèce humaine prématurément unifiée. Nous devons faire de la place pour des collectifs en conflit les uns avec les autres ... Nous devons remettre en question non seulement l'idée d'une Nature conçue comme indifférente à notre misère, mais également la notion d'humains prématurément unifiés.

2. Une proposition matérialiste et pragmatique pour aller de l'avant

Que faire ? Pour reprendre Descola (2011), le programme est vaste : « *La critique de l'opposition entre la nature et la culture implique un vaste remaniement des outils conceptuels ... Il s'agit d'abord de choix concernant l'emplacement des frontières ontologiques ... Il s'agit ensuite des systèmes de valeur qui orientent les rapports pratiques à autrui ... Il s'agit enfin des dispositifs de classement au moyen desquels les éléments du monde sont répartis dans des nomenclatures plus ou moins extensives* ». Un programme bien trop vaste pour moi, même si les composantes indiquées résonnent après tout ce qui précède. Je dois m'y prendre à ma manière, ce par quoi je veux dire (1) ne pas avoir pour prétention ni pour préoccupation le développement d'un « nouveau » cadre général, mais celui d'un cadre propre, pertinent car utile, et (2) le développer à partir de mon arrière-plan à moi. Je constate en effet que les efforts récents pour réellement « contourner » la dichotomie sont le fait de chercheurs issus des sciences humaines et sociales qui s'inscrivent dans la lignée de Marcel Mauss qui cherchait à faire en sorte que « *le cadre physique de l'activité humaine redevient une composante légitime de la dynamique du peuple, une potentialité actualisable dans tel ou tel type de morphologie sociale, plutôt qu'une contrainte causale tel ce facteur tellurique, l'influence du sol sur les sociétés, dont Marcel Mauss reprochait aux géographes de faire un usage excessif* »²⁹. Moi il me faudra inverser cela, aussi dans une perspective de collaboration avec ces sciences humaines, et considérer – pour reprendre les mots – le cadre *sociale* de l'activité humaine parmi l'ensemble des potentialités actualisables dans tel ou tel morphologie *physique*.

Ma critique de la dichotomie apporte elle-même déjà un certain nombre d'éléments, des *principes* à intégrer dans une approche fondée sur une base alternative :

- définir explicitement le cadrage et la conceptualisation des objets retenus comme outils épistémologiques de mes recherches (Raison 1) ;
- veiller à ce que ce cadrage et cette conceptualisation soient libres de toute considération morale et éthique (Raison 4) et culturelle (Raison 6) ;
- distinguer des autres objets ceux qui renvoient à une relation objet-sujet (Raison 5) ;
- et si jamais elle s'impose, introduire la dichotomie le plus tard possible (Raisons 2 et 3).

Mais cette fondation nouvelle elle-même, la base pour opérationnaliser Gaïa dans le champ qui est le mien, reste à créer. Je pense avoir trouvé ma clé dans la nature profonde du débat Nature-Société que ressort de mon analyse : celle-ci ne concerne pas tellement la question consistant à savoir si la réalité est bien composée de ces deux entités – ce que philosophiquement on ne peut en fin de compte trancher tout comme il reste difficile de statuer sur l'existence réelle de choses que nous ne pouvons que percevoir, un autre débat de toute ancienneté. Ce qui est plus au centre est de savoir comment considérer les relations entre ces deux entités, une fois que nous avons *décidé* d'adopter cette distinction comme un cadre pertinent de pensée et d'analyse ! L'observation qu'il s'agit là bien d'une *décision* me semble essentielle, et preuve en est que pas toutes les cultures l'adoptent. La question à

²⁹ extrait de la leçon inaugurale (de la chaire toutefois étrangement intitulée « Anthropologie de la nature ») de Philippe Descola au collège de France, 2001, qui s'y réclame même héritier de von Humboldt !
<http://www.college-de-france.fr/site/philippe-descola/inaugural-lecture-2001-03-29.htm>

laquelle j'ai donc à répondre consiste à savoir *quelles* décisions s'imposent à moi, et à quel niveau des démarches mises en œuvre.

En me posant cette question je touche à la théorie de la connaissance. Mes recherches et celles de mon unité *Recyclage & risque* couvrent une continuité entre positivisme et constructivisme (II.D ; Encadré II-1 ; A-8). J'ai insisté sur le besoin des deux, mais ils ne se situent pas au même niveau. Bien que guidé par des travaux constructivistes, une grande partie de ma propre production de connaissance – celle qui s'appuie aussi sur la production de mes collègues – est de nature positiviste, ne renonçant à l'objectivité qu'au moment de l'utilisation des connaissances scientifiques produites (à partir de quoi elles sont considérées comme des modèles et au même titre que les autres connaissances). Il s'agit de modèles qui sont le fruit du mariage entre le raisonnement et l'expérience, ce raisonnement inductif propre au positivisme, permettant de passer des faits aux hypothèses, de l'empirisme au réalisme. Ma définition du métabolisme industriel ou territorial (A-4), objet au cœur de mes travaux actuels, est aussi clairement d'inspiration positiviste et plus particulièrement matérialiste : l'étude de ce métabolisme m'amène à adopter le matérialisme ontologique, i.e. la conception philosophique qui soutient que la seule chose pouvant être considérée comme existante, i.e. en dehors de toute relation aux sujets, est la matière ; que fondamentalement, toute chose est composée de matière et que tout phénomène est le résultat d'interactions matérielles. Une réalité composée de matière et d'énergie – ou matière *baryonique* pour se placer dans le cadre de l'univers – que nous approchons au travers d'indicateurs et que nous classons en catégories. Une adoption instrumentale plus qu'une conviction philosophique, mais voilà un des piliers qui me semble convenir comme fondation pour ancrer mon positionnement. Où « ancrer » ne signifie pas que je me limiterais à cela, en conséquence de quoi je ne serais en mesure d'agir dans la société. Il s'agit de la posture sous laquelle j'effectue mes acquisitions de connaissance. Le besoin et l'utilisation de celle-ci, identifiés et déployés dans la société, relèvent d'un autre pilier et constituent sous le matérialisme des activités de traduction aux frontières.

Adopter une posture philosophique, même approximative, me paraît, dans le cadre d'une quête de clarté, tout à fait à sa place, puisque je me réclame d'un domaine, que dis-je, d'un champ scientifique que l'on ne peut qualifier que comme « en voie de devenir ». Isaiah Berlin (1956) l'expliquait fort bien :

The history of philosophy in its relation to the sciences consists in part in the disentangling of those questions which are either empirical (and inductive), or formal (and deductive), from the mass of problems which fill the minds of men, and the sorting out of them under the heads of the sciences concerned. It is in this way that, for instance, astronomy, mathematics, psychology, biology, etc., became divorced from the general corpus of philosophy (of which they once formed a part), and embarked upon fruitful careers of their own as independent disciplines. ... They remained within the province of philosophy only so long as the kinds of way in which their problems were to be settled remained unclear, and so were liable to be confused with other problems from which their differences had not been sufficiently discerned.

Les disciplines « naissantes » restent donc pour partie dans le giron de la philosophie. Et « interdisciplinarité » a forcément une composante philosophique. Encore faut-il les aborder, ces questions de fond, pour que des problèmes tels que l'évaluation environnementale ou l'écologie industrielle puissent se muer en discipline à part entière. Dans ces disciplines écologiques en devenir

provenant principalement des sciences humaines et sociales telles la sociologie environnementale, l'écologie politique, l'écologie urbaine ou encore l'économie écologique, il existe quelques auteurs qui, depuis le *nouveau paradigme écologique* de Catton et Dunlap (1980) en sciences sociales, se posent ces questions et tentent de formuler des propositions pour avancer (Beddoe et al., 2009; Moore, 2011; Norton, 1984; Wachsmuth, 2012). De tels questionnements semblent bien plus clairsemés du côté des « écologies » plus ancrées du côté des sciences biophysiques et de l'ingénierie comme l'écologie industrielle. Et en général la tendance qui semble prévaloir consiste à penser que l'on peut se dispenser du programme de Descola ; que le développement de l'interdisciplinarité va de soi – tel deux ingrédients que l'on mélange dans une marmite. J'y vois une des causes d'un changement que je crois observer dans notre langage, au quotidien mais aussi dans nos écrits scientifiques, où nous manipulons de nombreux termes comme s'ils correspondaient à des réalités évidentes, mais dont un examen montre qu'il s'agit de concepts souvent flous et dépourvus de définitions rigoureuses et/ou issus de cadres épistémologiques bien particuliers. Cela concerne fortement les catégories³⁰ que nous mobilisons dans nos tentatives de dissoudre la dichotomie, comme les nombreux objets qualifiés de « socio-écologique », de « socio-écosystèmes », de « systèmes naturel-humain couplés » (Liu et al., 2007), de « système humain-environnemental » (Scholz, 2011) ou encore les « services écosystémiques », produisant au passage cette « cicatrice ostensible » de Descola³¹. Qu'en aurait pensé un Ernst Mach (dans Aiken, 1956) qui, à la fin du 19^e siècle, quand les approches et les domaines respectifs des sciences de la nature et des sciences de la culture finissaient d'être délimités, afin de défendre la science comme la seule forme de *croissance rationnelle*, appelait les scientifiques à « *veiller continuellement contre l'utilisation par eux-mêmes de termes et de théories qui n'ont aucun lien déductible avec les faits expérimentaux* » ?

a) Repenser les catégories

Dans la position inconfortable qui est la mienne, une analyse des catégories en général paraît donc plus qu'un préalable, une entrée intéressante pour promouvoir la maturation du domaine dont je me réclame. Bien que sans doute fastidieuse pour le lecteur, elle devient même incontournable car avec l'abandon de la dichotomie dans le discours scientifique, des termes comme « phénomène environnemental », « impact écologique », etc. – termes si commodes dans la mesure où ils nous permettaient de croire à un discours scientifique rigoureux et partagé – viennent également de disparaître en tant que catégories absolues et auto évidentes. Comme l'a démontré Hamann (1730 – 1788, dans Berlin, 1956), le langage et la pensée ne sont pas deux processus, mais un seul : le langage transmet directement l'âme la plus profonde des individus et des sociétés ; nous ne formons pas d'abord des « idées », pour ensuite les « vêtir » en paroles, mais le fait de penser est d'utiliser des symboles. Donc nous ne pensons qu'au travers de modèles, ce qui accroît le poids des propos de Mach. Comment éviter de reproduire une telle situation de flou dans ma modeste contribution au programme de refonte de Descola ? Et où placer mes frontières ontologiques respectant le cadre philosophique adopté ?

³⁰ J'emploie le terme « catégorie » pour les mots que nous employons pour désigner, nommer les « choses » : les noms *communs*, ces substantifs que l'on utilise pour nommer tous les éléments d'un même « *ensemble* ». Cela souligne notre état de « *living in language* » (Ray Ison, Dialogues NSS juin 2016).

³¹ Descola (2011) : « de tels efforts de médiation ne peuvent que demeurer vains puisqu'ils reviennent à coudre à très gros points les deux pans du monde que notre cosmologie dualiste avait séparé, la cicatrice ostensible laissée par la suture venant plutôt souligner la dissociation que la dissoudre ».

La recherche plus « appliquée » ou « intégrée » se rapproche de la société comme client et objet, ce qui induit généralement une envie ou pression de lui attribuer des catégories propres, lui conférant ainsi une existence matérielle réelle. Une proposition rare et originale de délimitation de ce qui serait le champ de l'écologie industrielle, par l'institut des sciences environnementales de Leiden (CML), Pays-Bas (Figure III.2), l'illustre de façon intéressante : affectant l'ensemble des choses matérielles à « environnement », elle pose la société comme un espace symbolique et le domaine de l'écologie industrielle comme l'intersection des deux. Mais quel est ce lien entre symbolique et matériel ? Conférer une existence matérielle réelle aux « choses » de la société est à mon sens un glissement crucial que l'on franchit d'autant plus aisément du fait que toute existence réelle ne relève que de l'attribution d'indications à des catégories. Même des recherches se réclamant purement biophysiques se retrouvent ainsi à travailler avec des objets attribués à la société et, par *opposition*, avec des objets « naturels » (cf. la raison 5 de mon argumentaire de la précédente section).

Qu'est-ce que ce glissement ? Il se situe dans la signification que nous attribuons à nos catégories. En gros cela consiste à définir des catégories qui ne sont plus exclusivement basées sur les indicateurs de perception de la réalité, mais qui y adjoignent une *interprétation* ! Cette interprétation concerne sa *fonction*, chose qui renvoie à l'existence de quelque chose de plus vaste au sein de laquelle la catégorie perçue aurait donc un *rôle*. La conséquence directe de la dichotomie est une décomposition de la réalité en « systèmes », incitant ainsi à attribuer une fonction à toute chose. C'est cela que critique Latour (2015) quand il défend le concept de Gaïa. On crée par cette interprétation des méta-catégories – attributions fonctionnelles à des (ensembles de) matières – qui relèvent de méta-réalités : nous savons attribuer les signaux perçus – les valeurs d'un ensemble d'indicateurs – comme preuve de la présence de matières à classer alternativement dans des classes comme « sable », « gravier », « argile », « chaux ». Nous savons donc aussi détecter leur présence en mélange. Mais à partir du moment où l'on attribue ce mélange à une catégorie « béton » on crée bien une méta-catégorie *interprétant* ce mélange comme disposant d'une fonctionnalité dans un système qui quant à lui ne dispose pas d'une réalité matérielle.

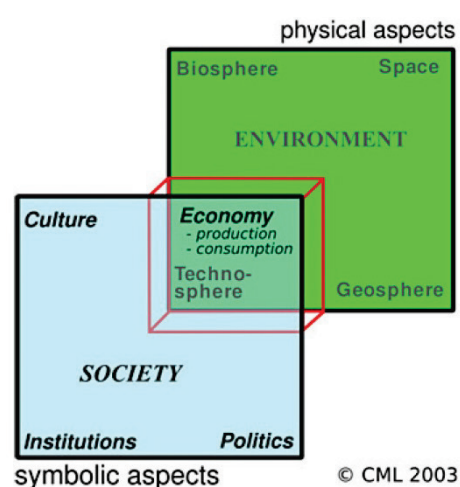


Figure III.2 La conceptualisation du champ de l'écologie industrielle selon le CML (<http://formations.cirad.fr/analyse-cycle-de-vie/pdf/HeijungsIntro.pdf>).

Entendons-nous bien, nous avons créé énormément de méta-catégories et le glissement est un peu plus subtil que ce que je viens d'indiquer. Afin de vous le décrire je suis obligé de vous proposer une classification schématique des catégories que nous pensons. Une classification qui vise à caractériser les principales « manières d'être » de la matière. Bref, une ontologie matérialiste rudimentaire et éphémère car sa visée n'est qu'instrumentale : cela me sert à identifier ensuite où et à quel moment on transgresse le matérialisme dans les recherches dont je me réclame (la suite de cette section III.A.2), puis à proposer une démarche mieux posée (section III.B). L'exercice est particulièrement utile pour mieux cerner la notion de « résidu » si central en écologie industrielle et dans les recherches de l'unité Recyclage & risque.

Au-delà de la classe correspondant à la matière « simple » ou « neutre » (dénommée « Classe 1 »³² dans le Tableau III-1), dépourvue d'une organisation à but fonctionnel, il y a celle des catégories qui renvoient à l'appartenance à un système – ce mot est crucial : le tout doté d'une finalité au sein duquel on distingue des parties qu'y remplissent une fonction – réel ou plutôt *actuel*³³, c.-à-d. pouvant être perçu, mesuré et délimité par quiconque et sans interprétation, produisant ainsi toujours le même résultat (« Classe 2 » dans le Tableau III-1). Ici « système » peut tout aussi bien correspondre à un système existant en dehors de la volonté de l'homme, un système modifié par l'homme ou un système créé par l'homme. Ainsi l'attribution de signaux à la catégorie *racine* renvoie à son appartenance à un système *plante*. Et l'attribution de signaux à la catégorie *pneu* renvoie à son appartenance à un système *véhicule* ou *vélo*. Il s'agit de ce que les philosophes appellent abstractions analytiques ou *intensives*. Puisqu'il est ici question de *fonction* il est important de noter qu'à partir de cette Classe 2, le respect de la loi de Hume devient moins impératif, à condition que sa « violation » se limite au système actuel : comme le disait McInerny (*Ethica Thomistica*, 1982) le « devoir être » est déjà incorporé dans le « être » des choses auxquelles on peut assigner une finalité, un objectif propre : par exemple, « *a clock is a device used to keep time. When one understands the function of a clock, then a standard of evaluation is implicit in the very description of the clock, i.e., because it "is" a clock, it "ought" to keep the time* ».

Classe de catégories	sous-classe	Label
1.		catégorie matière sans organisation à but fonctionnel
2.		catégorie matière à laquelle nous attribuons une fonction car <i>appartenant</i> à un système détecté comme disposant d'une existence réelle
3.		catégorie matière à laquelle nous attribuons une fonction car <i>interprété</i> comme <i>appartenant</i> à un système modèle (aux fonctions matérielles/détectables ou pas)
	a.	cas d'un système modèle dont la réalité matérielle correspondante n'a, depuis une certaine « baseline » ³⁴ , pas connu d'influence humaine altérant son fonctionnement
	b.	cas d'un système modèle dont la réalité matérielle correspondante connaît ou a connu une influence humaine altérant son fonctionnement
4.		catégorie immatérielle à laquelle nous attribuons une fonction car constituant un élément d'un système modèle
	a.	des abstractions de la catégorie 3.2 (ne considérant QUE les interprétations de fonctions immatérielles)
	b.	des catégories qui n'ont aucun lien avec quelconque matérialité, relevant que de fonctions attribuées au sein d'un système modèle immatériel qui, forcément, nous concerne

Tableau III-1 Proposition d'une classification logique des catégories

L'interprétation fait son entrée avec la Classe 3, ce qui signifie aussi que nous quittons là la stricte réalité matérielle pour entrer dans les catégories qui renvoient à une relation objet-sujet : le système

³² Je leur attribue juste des numéros pour bien souligner qu'il s'agit d'une organisation tout à fait provisoire, nullement stabilisée.

³³ Dans le sens anglosaxon de « actuality » versus « reality » : An ACTUALITY is that which involves action or exists in motion and can never be considered static - REALITY is that which is perceived with a subjective consciousness and interpretation, meaning or value. C'est aussi le sens donné au métabolisme industriel quand je le décris comme un « actuality » (A-4). Source : <http://www.crcsite.org/actuality.htm>

³⁴ voir la discussion sur le « shifting baseline syndrome », Raison 1, section III.A.1.

auquel l'attribution fonctionnelle fait référence n'est ici plus un tout résultant de seules observations. Il s'agit d'ensembles de catégories de Classe 1 et 2 que nous *interprétons* comme constituant un système. Ce ne sont en fait seulement que des modèles déposés pour favoriser l'étude et la compréhension du « fonctionnement en relation » des catégories le composant. Le glissement indiqué précédemment me semble se situer ici : à force de se référer à ces modèles, ils ont fini par « prendre corps »³⁵. Des catégories de classes 1 et 2, comme des organismes vivants, la nécromasse, l'eau, des minéraux cristallins et amorphes situés à la surface terrestre dans une couche au contact de l'atmosphère, sont *interprétés* comme appartenant à un *système sol*. Il ne s'agit là toutefois que d'un modèle supposant une interdépendance de ces catégories ainsi qu'une finalité de cette association consistant à évoluer vers un état d'équilibre. Il en va de même de la plante à laquelle on reconnaît une fonction au sein d'un *écosystème*, dont le passage du statut modèle au statut de système réel – ainsi doté d'une supposée finalité d'équilibre – va d'ailleurs à l'encontre de l'objectif de Tansley, l'éminent scientifique ayant proposé ce modèle si malencontreusement dénommé, mais qui luttait justement contre cette idée d'un Tout au sein duquel les composantes aient une fonction assignée. C'est bien pour cela qu'un professeur en science des systèmes comme Ison (2008) insiste sur la distinction entre *situation* et *système*, et le passage de l'un à l'autre : les éléments d'une *écosituation* donnée auraient quant à eux pu être considérés dans la classe 2... Les catégories de classe 3 correspondent donc à des choses *matérielles*, mais composantes de *systèmes modèles* – car leur qualité système reste une hypothèse – perçus comme dotés d'une réalité matérielle du fait de ses composantes et de leurs interactions.

Avec ces classes nous ne couvrons toutefois seulement les catégories auxquelles nous conférons une existence matérielle. Il reste un grand ensemble de catégories à l'existence immatérielle, appartenant à ce que d'aucuns appellent le monde « symbolique » (Figure III.2), que l'on peut regrouper dans une classe 4 (ce qui rappelle les espaces séparés de « l'environnement perçu » et de « la réalité biophysique », reliés par les indicateurs, de la Figure II.17). Bien qu'ils sortent de mon cadre matérialiste *sensu stricto* du fait de leur immatérialité – ce qui au passage m'autorise à ne pas proposer de différenciation au sein de ce grand ensemble – il importe de s'y attarder un peu. Dans ce monde symbolique, les systèmes auxquels appartiennent ces catégories existent seulement parce que nous leur reconnaissons un intérêt, avec pour conséquence d'attribuer une *valeur* aux fonctions que ces catégories y remplissent (ce qui renvoie à la discussion sur l'évaluation environnementale, section II.D.2). Voilà une chose qui ne constitue pas une condition à l'existence, une propriété intrinsèque, dans les classes 1, 2 et 3, bien que nous doublions souvent l'attribution fonctionnelle de classes 2 et 3 d'une attribution de valeur.

Si toutes ces catégories de classe 4 se cantonnaient à ce monde symbolique – tel l'argent au sein d'un système financier ou une loi au sein d'un système législatif – je pourrais en rester là. Mais grand nombre de ces catégories sont en fait des *abstractions* de catégories appartenant aux classes 1 à 3 (Tableau III-1) ! Pas étonnant, car la raison d'être – si tant est qu'ils soient – de systèmes symboliques se trouve pour bonne partie dans le besoin de gérer la relation avec le monde matériel (où l'on se trouve justement dans l'espace de l'écologie industrielle, cf. la Figure III.2). Comme le notait Maurice Godelier (1984) :

³⁵ Cela correspond à la confusion entre systèmes comme épistémologies et systèmes comme ontologies soulignée par Ison (2016).

Toutes les formes d'activités concrètes que l'homme a inventées pour s'approprier des réalités naturelles contiennent et combinent à la fois et nécessairement des gestes et des conduites matérielles pour agir sur leur aspects visibles et tangibles, et des gestes et des conduites que nous appelons aujourd'hui symboliques pour agir sur leur arrière-fond invisible.

Mais ces abstractions correspondent à des *généralisations* de catégories matérielles considérant toutefois seulement les interprétations/attributions de fonctions/valeurs immatérielles ! Ainsi « or » y est considéré seulement comme vecteur de fonctions/valeurs esthétiques ou financières, « charbon » ou « gaz » comme vecteur de fonctions/valeurs utilitaires et de confort, ou de risques, certaines plantes comme étant une catégorie à fonction/valeur alimentaire, une chaussée n'est vue que comme constituant un segment d'un réseau routier, etc.

Au vu de la posture matérialiste adoptée, ni ces catégories de classe 4, ni leurs fonctions et valeurs, ni les systèmes auxquels elles appartiennent ne constituent une *actualité* (cf. note de bas de page 33) matérielle. Leur connaissance m'importe toutefois car il s'agit de catégories que nous, les humains, estimons utiles de traiter *comme si* elles furent réelles – des abstractions que nous *réifions* : elles en remplissent d'autant mieux les fonctions que nous leur avons attribuées, car celles-ci ne relèvent pas seulement de la gestion des relations entre humains, mais également entre nous – en tant que matière animée – et le reste de la réalité matérielle. Le truchement que nous opérons pour cela consiste à amalgamer pour ce dernier ensemble d'abstractions – la classe 4a du Tableau III-1 – les objets mentaux avec les objets empiriques dont ils représentent une généralisation, aussi appelé *abstraction extensive*³⁶ : une nouvelle étape d'interprétation, réductionniste cette fois, que nous mobilisons dans les travaux constructivistes alimentant les démarches participatives. Cet amalgame constitue une extension du glissement indiqué au niveau de la classe 3, où les catégories sont interprétées comme appartenant à des systèmes modèles – entités conceptuelles – auxquels nous conférons souvent une réalité empirique. Et celui-ci l'a, je le crois, grandement facilité : en inversant cette logique, cette interprétation transgressive, il devient aisé d'associer chaque abstraction mentale à une instance de la réalité matérielle correspondante.

Ce que je viens de proposer n'est pas très éloigné des conceptions stratifiées de la réalité, les ontologies, propres à certaines doctrines philosophiques. A commencer par les qualités primaires et secondaires des objets que distinguaient Locke et Descartes. Ce qui perdure jusqu'à nos jours avec e.g. le réalisme critique de Bhaskar qui stratifie le réel en trois niveaux : l'empirique, l'actuel et le réel (1997). Mais ne vous y méprenez pas : proposer une telle théorie générale, un système de concepts totalisants n'est nullement mon but – si déjà j'en fus capable. Il s'agit d'une stratification instrumentale, épistémologique, propre au contexte qui est le mien. Elle me sert à circonscrire le domaine qui est le mien, de produire ma frontière ontologique. Elle paraîtra certainement fort déséquilibrée à ceux dont le centre de gravité du domaine respectif se situe e.g. dans tout ce que moi je classe de manière rudimentaire dans une classe « 4 » dont vous aurez compris que j'estime qu'elle ne me concerne pas *directement*, i.e. dans ma production de connaissances primaire.

Vous aurez également compris que cette classification rudimentaire n'est pas seulement – pour partie – hiérarchique, où les systèmes d'appartenance des catégories de la classe *n* constituent les *catégories* de la classe *n+1*, mais elle présente aussi un rattachement différencié aux disciplines scientifiques.

³⁶ voir la définition sur <http://carlos-trigoso.com/2014/06/09/intensive-and-extensive-abstraction/>

Ainsi un géochimiste manipule des catégories de la classe 1 et un biologiste – mais aussi un médecin – celles de classes 1 et 2. Ceux, comme l'économiste ou le sociologue, qui s'intéressent exclusivement à l'état de vie humaine collective, la *société*, sont concernés par les catégories de la classe 4. Ceux-là limitent leur champ d'étude à une sous-classe regroupant les catégories du système symbolique *société* – cas du sociologue – ou repartissent ces objets conceptuels dans un système symbolique dichotomique *société* – *nature*. Voilà d'ailleurs ce à quoi je propose de cantonner la dichotomie pour ceux, nombreux, souhaitant la maintenir³⁷. Mais ce qu'il convient de faire à ce stade est de comparer la posture matérialiste et sa frontière ontologique proposées avec les postures qui prévalent dans les disciplines et champs dont je me réclame : la recherche dite « intégrée », l'écologie industrielle et le champ de l'évaluation environnementale. Et de justifier cette proposition en cas de divergence.

b) La recherche « intégrée » projetée sur cette classification des catégories

Comment se positionnent les disciplines telles que la géographie, l'anthropologie, l'agronomie ou encore l'écologie qui étudient l'action de l'homme, parmi d'autres *forces d'agir*, pour employer le terme de Latour (2015), se réclamant ainsi de la recherche *intégrée*, dans une *situation* matérielle concrète (et souvent rapprochée d'un « système complexe ») ? Sans être en mesure de traiter cette question-là pour chacune de ces disciplines, il me semble pouvoir caractériser l'approche générale suivie dans les cas où il est considéré utile ou nécessaire de différencier l'action de l'homme et ses effets sur la matière de ceux des autres forces d'agir.

Tout d'abord on *décide* d'une répartition jugée pertinente des catégories d'intérêt de classe 4. Cela ne pose pas de problème car il s'agit d'objets conceptuels caractérisés par leurs fonctions au sein de systèmes conceptuels (ici le système sous influence de l'homme – désigné par *société*, *économie*, *technosphère*, *anthroposphère*, etc. – et celui situé en dehors : *nature*, *environnement*, *biosphère*, *écosystème*, etc.)³⁸. On peut ainsi trouver une même catégorie matérielle correspondante (de classe 1, 2 ou 3) de chaque côté, suivant sa *fonction* dans l'un ou l'autre, et la faire passer d'un système modèle à l'autre. C'est par exemple le cas de *ressource naturelle*, une catégorie de classe 4 par excellence : la *ressource* – un *moyen* dont on dispose (permettant donc d'atteindre un but) – minérale

³⁷ où les possibilités de répartition sont de facto nombreuses. Boyden, directeur du programme UNESCO sur l'Homme et la Biosphère (dans Scholz, 2011, 318) met, comme le fait aussi l'analyse de cycle de vie, l'humain et les artefacts du côté de la société, les excluant ainsi de la biosphère, assimilée quant à elle à la *nature*. On y assume explicitement qu'une telle dichotomie ne correspond nullement à celle entre actualités biophysiques et culture abstraite. Bien que se revendiquant du réalisme, Scholz adopte aussi le fonctionnalisme et le constructivisme. Il situe donc bien sa dichotomie dans la classe 4, mais la place de manière plus classiquement sociologique entre le social (« social-epistemic ») et le matériel-biophysique, i.e. une *société* qui ne contient ici pas les artefacts. Mais il propose une seconde dichotomie indépendante, ne faisant appel ni à *société* ni à *nature*, distinguant des « systèmes humains » et des « système environnementaux » - où ces derniers correspondent à des abstractions *fonctionnelles sélectives* de la réalité. Les deux types de système comprennent donc chacun toujours une dimension sociale (socio-épistémique) et matérielle... Le « human-environment system » de Scholz se distingue donc d'encore une autre dichotomie, celle implicite dans le « système socio-écologique », une catégorie dichotomique holistique de classe 4. Je la qualifie et classifie comme telle car c'est une représentation de la réalité comme système et qui, tout en insistant sur leur « intégration », distingue – du fait justement de l'accent mis sur les « *links* » et des « *feedbacks* » – un système social d'un système écologique.

³⁸ L'ouvrage de Mathevet & Bousquet (2014) l'illustre bien quand ils abordent le besoin pour l'interdisciplinarité d'intégrer, plus que de juxtaposer, des savoirs : « l'analyse des systèmes complexes se trouve à la croisée des sciences naturelles et des sciences de l'homme et de la société ; elle privilégie aussi bien des perspectives fonctionnelles (l'eau, le sol, la biodiversité, etc.), les intérêts des parties prenantes que des systèmes de valeurs ». *Fonction, intérêt, valeur* : en dehors de toute empirisme matérialiste, on reste là dans l'étude d'objets symboliques au sein d'un système « socio-écologique » dont la nature conceptuelle est assumée (« le système est une construction intellectuelle utile pour aider à penser », p145), traitée comme une sorte de réunification intellectuelle à partir de la dichotomie traitée quant à elle comme une réalité (« Pour penser les interactions entre la sphère humaine et la sphère écologique, nous devons *considérer* le fonctionnement du monde comme un véritable système », p17) – une inversion de raisonnement qui paraît répandue.

ou biologique nécessaire à la vie de l'homme et à ses activités économiques. Pas de souci donc de reconnaître du charbon, à fonction de réservoir tampon – un moyen en attente de *servir*, dans le *système nature*, à finalité de maintien d'équilibre. Puis de même du côté de la *technosphère*, à fonction énergétique dans ses sous-systèmes. C'est ainsi que l'économiste propose d'*internaliser* des choses jusque-là considérées comme *externalités* : sans que cela n'affecte la réalité matérielle d'une catégorie, on décide de changer la place de son abstraction au sein du monde symbolique.

Mais contrairement au cas de l'économiste, suit ensuite dans la recherche *intégrée* une étape où on retourne à l'étude d'une réalité matérielle en assimilant les objets empiriques aux objets mentaux à l'aide du glissement précédemment décrit, les attribuant par-là de facto aux systèmes conceptuels correspondants. Il s'agit là d'un passage fort périlleux car ce problème est mal posé, au sens de Hadamard³⁹. L'exemple de la ressource naturelle l'illustre : au-delà du fait que par exemple « charbon » relève de la classe 1, étant donc dépourvu de quelconque appartenance systémique, comment accepter qu'une seule et même instance⁴⁰ matérielle puisse alternativement, simplement en fonction de sa situation, appartenir à l'un ou à l'autre système pourtant présentés comme structurellement distincts et séparés ? Comment éviter que l'idée qu'un objet empirique puisse passer de l'un à l'autre système modèle n'induisse l'envie, le besoin, de *matérialiser* aussi la limite entre ces deux systèmes – ce dont j'ai démontré l'impossibilité ? Comment gérer que, du fait que l'emplacement de la limite entre systèmes modèles dépend de *choix*, on puisse être confronté à plusieurs possibilités de *réalité*⁴¹ matérielle ? Et si on était d'accord sur un classement binaire des objets empirique, passe-t-elle l'épreuve de la logique : le fleuve Seine passe-t-il dans la ville Paris, la coupant en deux, ou l'inverse ? Chacune des options risque de nous poser problème.

Les solutions plus ou moins consciemment adoptées consistent en un mélange à dose variable de deux choses : on évite la matérialisation de la limite, soit en se focalisant sur ce qui se trouve plus au centre qu'au bord de chaque système « conceptuello-empirique », soit en profitant du statut de système modèle des objets de la classe 3 – donc des systèmes d'appartenance partiellement matérialisé – en attribuant implicitement les objets matériels, à travers de l'attribution de ce système modèle à l'un ou à l'autre ensemble conceptuel. Suivant cette dernière astuce, un objet matériel donné, situé dans ce qui est déclaré comme un *écosystème*, se retrouve ainsi du côté opposé d'une autre instance de ce même objet, situé lui dans un *agrosystème* (correspondant aux sous-classes 3a et 3b du Tableau III-1). Le besoin grandissant d'étudier les relations matérielles de manière intégrée induit ainsi assez logiquement la proposition du concept d'*agroécosystème*, un système conceptuel dont il n'est toutefois nullement plus aisé de le faire correspondre à une quelconque réalité matérielle rigoureusement définie.

Ce qui se dégage est une situation où les disciplines étudiant l'action de l'homme parmi d'autres *forces d'agir*, mais souhaitant à cette fin d'analyse maintenir cette distinction, s'obligent par-là à adopter une séparation *a priori* de la réalité matérielle en deux ensembles. Et que la proposition « commune » consiste à placer cette séparation au sein de la classe de catégories 3, affectant du coup par filiation hiérarchique les catégories de classe 1 et 2 aux ensembles correspondants. Cela est donc en conflit

³⁹ Hadamard (1865-1963) pensait que les modèles mathématiques de phénomènes physiques devraient avoir les propriétés suivantes : (1) Une solution existe ; (2) La solution est unique ; (3) La solution dépend de façon continue des données dans le cadre d'une topologie raisonnable.

⁴⁰ au sens de la terminologie de la simulation multi-agent : un individu de la catégorie (« classe » dans cette terminologie)

⁴¹ voir la note 33

avec ma proposition de cantonner la dichotomie à des ensembles de catégories de systèmes symboliques, donc de classe 4. Mais c'est une solution commode car la distinction est, du coup, basée sur la distinction entre deux types de systèmes modèles, contrairement à une matérialisation de la distinction dans la réalité. Mais elle n'est au contraire nullement objective ni rigoureuse, et du coup non plus aisément transposable, car instable, ni indiscutable. Elle est constructiviste, mais sans assumer ce statut. Les termes de la définition des ensembles de systèmes modèle (sous-classes 3a et 3b) indiquent la subjectivité : quel choix de « baseline » ? L'influence humaine doit être connue, donc l'appartenance des catégories dépend de la démonstration de cette influence dans le système modèle correspondant. Et à partir de quand peut-on parler d'altération ? Retournons à l'exemple du pneu : remplissant sa fonction dans le système véhicule il reste « affecté » au système modèle *société*, même si le véhicule correspondant se trouve dans une réalité matérielle – associée à la fameuse catégorie de classe 4 *environnement* – affecté quant à elle à un système modèle tel que *forêt naturelle*. Or, une fois abandonné après usage (i.e. perte de fonction) dans cette même forêt, il est considéré comme faisant partie de ce système-là, bien qu'avec un statut particulier de corps étranger (car résultant plus du « rejet » du système de départ que de « l'acceptation » par celui-ci), référant ainsi à son rôle inconnu – un rôle qui dans cette catégorie, je le rappelle, ne relève toujours que de l'interprétation. Mais imaginez aussi la déposition de milliers de pneus dans cette forêt (ou voyez plutôt la Figure III.3) : il suffit d'employer le mot *décharge* pour basculer dans l'autre ensemble de systèmes modèle ! Et, comme on le voit avec la catégorie *environnement*, la difficulté de la séparation a priori – largement passée sous silence – est encore nettement aggravée par la confusion qu'introduisent les associations de catégories de classe 4 (e.g. les cas de *ressource* ou son antonyme *déchet*) avec des catégories matérielles : ces associations-là constituent souvent des raccourcis qui permettent aux catégories de classe 1 d'intégrer le sous-ensemble *société* de la réalité matérielle, sans passer par une quelconque fonctionnalité matérielle, même interprétée.



Figure III.3 90 000 tonnes de pneus déchargés dans « l'environnement » à côté de la ville – fantôme quant à elle, issue de la bulle immobilière – El Quiñon, Espagne (The Guardian, 16/10/2015 ; photo Pablo Blazquez Dominguez/Getty).

Je pense à ce stade pouvoir conclure que cette situation n'est pas seulement en conflit avec ma proposition de cantonner la dichotomie aux catégories de classe 4, mais surtout qu'elle ne permet pas de rendre rigoureusement compte de la manière dont l'action de l'homme, comme *force d'agir* particulière, affecte une *situation* matérielle concrète. Si la projection d'une actualité matérielle dans deux ensembles de catégories de classe 4 peut en effet être requis dans un objectif particulier, fonder de manière *a priori* la recherche sur l'association d'une telle distinction avec une situation matérielle ne paraît pas à même d'assurer la compréhension de cette dernière. Plus particulièrement, l'exemple du pneu révèle le statut ambigu des ensembles de matière associés à la catégorie *déchet*, une catégorie qui concerne l'écologie industrielle au plus haut point.

c) *L'écologie industrielle projetée sur cette classification des catégories*

L'écologie industrielle (EI) suit la logique générale décrite ci-dessus, mais avec les particularités de s'intéresser plus spécifiquement (1) aux catégories proches de la limite *nature – société*, (2) en se donnant pour mission d'étudier et d'agir sur les seuls catégories situées du côté *société* de la limite, forcément matérialisé car (3) considérant l'association entre catégories symboliques et empiriques de manière plus lâche, explorant justement des changements et des multiplications de fonctionnalités. Bien que je crois y déceler d'importants potentiels, il s'agit, du fait de ces particularités, d'un domaine encore peu mature à la problématique mal posée⁴² : la seconde particularité, ce focus sur l'une des deux colonnes du tableau de distribution des objets dont Descola (2011) disait qu'il rend la dichotomie substantive, empêchant toute appréhension fine de la matière, n'assure en effet en rien le traitement approprié des « interactions nature – société »⁴², de « supprimer les barrières cognitives entre sciences naturelles et sociales » (Bruckmeier, 2013). Les études portant sur l'analyse de métabolismes socioéconomiques (voir e.g. le numéro spécial du Journal of Industrial Ecology de fin 2015 : volume 19, n° 5) l'illustrent bien. Censé être un concept clé de l'EI, son nom indique pourtant bien qu'il ne s'agit là que du « *material, substance or energy throughput of socio-economic systems, i.e. all the biophysical resources required for production, consumption, trade and transportation* » (Haberl et al., 2013) : la matière n'existe que comme *ressource* au sein d'un système conceptuel hors-sol, où l'écologie est considérée comme absente. L'écologie ne serait concernée qu'au-delà, au travers de l'extraction des *ressources* entrant dans le socio-écosystème, ou les *déchets* sortant. Haberl et al. (2013) le reconnaissent en effet car ils poursuivent en disant « *We also introduce the broader concept of socio-ecological metabolism, which additionally considers human-induced changes in material, substance or energy flows in ecosystems. ... [car] ... Accounting for socioeconomic metabolism is not sufficient, however, if one aims to understand the impact of human activities on stocks and flows of material and energy in the biosphere* ». Si l'idée est louable, elle n'a pour l'heure pas vraiment connu d'essor. Chez Haberl et al. (2013) elle se limite à l'estimation de la production primaire nette appropriée par l'homme, pris comme indicateur d'impact, mais sans que ce dernier soit réellement considéré. Et cela nous ramène d'ailleurs au *shifting baseline syndrome*, car quel est donc cette production primaire de la « végétation naturelle potentielle » qui fait référence ? Et les seules autres études qui prétendent s'intéresser au métabolisme socio-écologique ne vont pas plus loin (Hall, 2011) ou le confondent avec le métabolisme socio-économique (Erb, 2012). C'est bien ce focus socio-économique et sa déconnexion de toute actualité matérielle qui empêche la communauté de voir le métabolisme (peu importe son qualificatif : industriel, social, socio-économique, socio-écologique, territorial) autrement que comme analogie, métaphore ou modèle, ce que mon argumentation récente dénonçait (A-4).

⁴² La mission que se donne l'institut d'Ecologie Sociale de l'Université de Klagenfurt

Surtout, pour revenir aux première et troisième particularités indiquées ci-dessus, l'EI est un domaine de recherche « intégrative » particulier dans le sens où elle focalise sur la partie épistémologiquement problématique, au lieu de dissimuler le problème en s'en détournant (cf. la situation décrite pour la recherche intégrée dans la section précédente). Ce qui ne signifie pas pour autant qu'elle prenne le problème à bras le corps, comme on vient déjà de le voir ci-dessus. La cosmologie dominante empêche certainement le prérequis : l'identification même du problème. Chose d'autant plus difficile que la communauté est très diversifiée : au sein même de l'EI des visions très technologiques, liées à son origine en ingénierie industrielle, à la fois matérialistes et économiques, dont les objets relèvent surtout de classe 3b (Tableau III-1), ne semblent pas toujours en phase avec des visions « socio-écologiques »⁴³, à l'orientation plus socio-politique, approchant la réalité plus par association à partir d'objets abstraits relevant de la classe 4. Ce dernier courant de l'écologie sociale, assez vaste et dépassant largement la communauté de l'écologie industrielle, se cantonne d'ailleurs le plus souvent aux objets de classe 4. Et si ses principaux porte-paroles cherchent, sans trop y parvenir, à abattre la dichotomie conceptuelle (les fameux « socionatures » et « systèmes socio-écologiques », e.g. Folke, 2006; Folke et al., 2016; Ostrom, 2009), d'autres défendent vigoureusement leur maintien comme une spécificité essentielle (e.g. Bruckmeier, 2013⁴⁴).

L'EI, peut-on donc conclure, ne s'intéresse pas directement à l'actualité matérielle, mais toujours à la fonctionnalité de la matière au sein d'un système modèle ou symbolique. C'est ce qui explique l'accent mis sur les *ressources*. Logiquement il devrait en être de même pour la catégorie *déchet*, surtout au sein du sous-domaine de la symbiose industrielle (SI), ou de ce qu'en France on a tendance à désigner par écologie industrielle territoriale (EIT, Abitbol et al., 2014). Je m'attarde un instant sur cette discipline-là car elle me concerne particulièrement, mais aussi parce que je l'estime sous-considérée par l'EI tandis qu'elle dispose d'une caractéristique bien particulière. Qu'est-ce qui différencie le *déchet* de la *ressource* ? Il s'agit de la matière associée à une valeur instrumentale *passée*. Sans lui accorder une valeur actuelle, donc une fonction au sein d'un système, ce passé lui interdit d'être une simple matière de classe 1. Contrairement au cas de son antonyme *ressource* où l'association d'une catégorie de classe 1 à celle-ci relève d'une décision, c'est ici la dissociation de cette association qui nécessite une décision ! Une décision qui intervient avec un décalage plus ou moins important par rapport au moment de la perte de fonctionnalité. Dans le cas commun, et structurant en écologie industrielle, d'une dichotomie au niveau de la classe 4 associée à toutes les catégories matérielles, cela en fait l'unique catégorie pouvant disposer d'un statut hybride, i.e. pouvant être affectée à l'ensemble *nature* sans forcément immédiatement être dissociée de l'ensemble *société* : c'est ce que j'indiquais précédemment par *corps étranger*. Mais si une telle situation intervient, cela interdit le *déchet* pourtant un retour au seul ensemble *société*, car cela intervient à partir du moment où l'on suppose que l'objet matériel correspondant ne sera plus soumis à l'action humaine. Il se trouve dans une sorte de salle d'attente, un *no man's land*, tant que l'on puisse identifier sa valeur instrumentale passée, et tant que sa matière n'est pas reconnue comme ayant réintégré un cycle *naturel*. A part le fait que cela pose un problème logique dans une vision fondée sur une stricte dichotomie, cela pose aussi des problèmes épistémologiques à la symbiose industrielle : la dichotomie empêche la considération dans un métabolisme industriel de matières associées à une catégorie *déchet* affectée à l'ensemble *nature*,

⁴³ L'institut d'Ecologie Sociale de l'Université de Klagenfurt à Vienne est un représentant particulièrement influent de cette vision-là au sein de l'écologie industrielle.

⁴⁴ « *With the notions of society and nature, a historical memory of the changing interactions of society and nature is kept in social ecology that seems lost in other forms of sociological and ecological research.* »

car nous prenons dans cet ensemble – que cette matière n’a dans cette vision-là de toute façon pas encore pleinement réintégrée – seulement les matières associées à une catégorie *ressource*. Il nous faudrait pour cela soit agir sur la matière pour la dissocier de *déchet*, ce que son affectation à l’ensemble *nature* nous empêche, soit avouer l’existence du *no man’s land* en déplaçant la limite à notre guise.

Or, si la SI s’interdit pour l’heure, comme soulevé ci-dessus, de voir le métabolisme autrement que comme analogie, métaphore ou modèle, elle s’efforce néanmoins d’imaginer une limite entre catégories de classe 1 associées à ses catégories de classe 4. Traitée telle une réalité absolue, la SI s’interdit donc tout « déplacement » de cette limite⁴⁵. L’EI ne fait en cela pas partie du domaine de l’écologie où, comme le soulevait Deléage (1994), « *Tansley insistait déjà fortement sur le fait que les écosystèmes ne sont pas des données brutes de la nature, mais le produit d’une création mentale qui nous permet de les isoler en imaginant une frontière entre eux et le reste de l’univers. [...] Il démontre l’absurdité de conférer deux statuts différents au broutage des herbivores sauvages et à celui des herbivores domestiques : Cette position consiste à postuler une frontière naturelle entre des activités humaines qui resteraient totalement subordonnées à la dynamique spontanée des communautés biotiques et d’autres, celles des sociétés modernes, qui seraient considérées comme purement destructrices* ».

L’analyse de flux de matière (Material Flow Analysis : MFA), une méthode au cœur de la SI, a par définition besoin d’une telle frontière car, s’appuyant sur la loi de la conservation de la matière, elle prétend estimer des bilans de matière : La MFA considère l’ensemble des matières passant cette frontière, dans un sens ou dans l’autre, et celles résidant à « l’intérieur ». Cela illustre au passage le focus sur l’une des deux colonnes du tableau de distribution des objets, discuté ci-dessus, ainsi que le fait que l’EI suit bien la logique décrite dans la section précédente : *Matière* est ici en effet entendue comme *substances*, donc les catégories de classe 1, et *biens*, catégories de classes 3, traitées sur un pied d’égalité⁴⁶ en approchant les deux au travers de leurs équivalents abstraits : on n’étudie pas directement des matières mais on les considère comme objets abstraits dès leur « entrée » dans un système symbolique. Brunner et Rechberger (2004) reconnaissent que l’établissement des limites, cette frontière du système pour laquelle on souhaite établir le bilan matière, est une « *decisive and demanding task* ». On peut suspecter que si l’exercice est difficile, c’est aussi parce qu’il est mal formalisé : si la matérialisation d’une frontière dans l’espace est présentée comme la règle générale (« *The spatial system boundary is usually fixed by the geographical area in which the processes are located.* »), d’autres approches ne sont pas exclues (« *Abstract areas also can serve for a boundary definition when MFA is applied to a specific part of the economy...* »), sans que soit soulevé le besoin de concilier les deux : comment « fermer » et établir des bilans matière de ces derniers, des systèmes exclusivement symboliques ? Ils admettent en revanche que « fermer » un système *anthroposphere* (« *driven by man* ») de son *environnement* (« *driven by nature* ») implique aussi la définition d’une

⁴⁵ Brunner & Rechberger (2004) par exemple évacuent le sujet en disant simplement que “*Waste management takes place at the interface between the anthroposphere and the environment.*”

⁴⁶ Brunner & Rechberger, 2004 : « The term *material* stands for both substances and goods. In chemistry, a *substance* is defined as a single type of matter consisting of uniform units. [...] *Goods* are substances or mixtures of substances that have economic values assigned by markets. The value can be positive (car, fuel, wood) or negative (municipal solid waste, sewage sludge). In economic terms, the word *goods* is more broadly defined to include *immaterial* goods [...] In MFA terminology, however, the term *goods* stands for material goods only. »

frontière spatiale dans la troisième dimension, verticalement, dont la nature arbitraire est mise en évidence par les exemples fournis.

Il me semble donc pouvoir constater que la communauté diversifiée de l'EI souffre du syndrome du perroquet de Locke (section III.A.1). Surtout du fait d'un manque de formalisation et/ou de son explicitation, les mêmes termes peuvent être employés pour désigner des objets qui ne se situent pas au même niveau. Et contrairement à son aspect « rassurant » en apparence, le strict respect de la dichotomie ne paraît pas à même de clarifier la situation. Au contraire.

d) L'évaluation environnementale projetée sur cette classification des catégories

Poursuivant mon analyse stratifiée, je n'aborde ici l'évaluation environnementale (EE) seulement qu'en tant que composante de l'EI, intervenant donc au niveau de la conception de produits, de procédés ou de systèmes techniques – donc des catégories de classe 3 ou 4, conçues à partir de, composées de, puis décomposées respectivement en catégories de classe 1 et 2 ou en catégories 4 (abstractions de catégories 1, 2 et 3). Je laisse de côté les domaines plus anciens et relativement distincts – notamment en termes de leur considération de la matérialité – que sont l'étude d'impact environnemental et l'évaluation de risque. Je fais de même de notre propre contribution méthodologique à l'EE dans le cadre de la SI (A-1 et section II.D.2.a), car celle-ci n'a pour l'heure pas produit d'incidence sur la pratique d'EE au sein de cette communauté.

L'EE, qui du coup se limite à la méthode de l'analyse de cycle de vie (ACV), se caractérise par la même tension que l'EI, ne s'intéressant pas directement à l'actualité matérielle, mais toujours à la fonctionnalité de la matière au sein d'un système modèle ou symbolique tout en prétendant, généralement, de s'exprimer sur des processus matériels empiriquement vérifiables. C'est ici inhérent aux termes même du domaine : évaluation – valeur accordée par l'homme – et environnement – perçu par l'homme (A-1). En recouvrement avec la MFA, l'EE s'intéresse aux sous-ensembles de flux abstraits de matière que sont ceux sortant de, ou entrant dans le système modèle ou symbolique, respectivement vers l'*environnement*, ou venant de la *nature*, les deux étant considérés comme des abstractions synonymes d'une supposée réalité matérielle. Un tel focus sur les entrées et sorties équivaut évidemment à un rôle clé de la limite entre le système technique produisant l'objet évalué et cette *nature* supposée l'entourer. Or, ce système technique relève la plupart du temps de la classe 4 et sa limite n'a ainsi rien de matériel. Les praticiens en sont conscients comme l'illustre Hélias (2016) qui relève l'incohérence dans l'ACV où le placement – relevant donc d'une décision d'expert ! – de cette limite peut varier entre composantes d'un système technique : une composante agricole considérerait ainsi la nitrification et la dénitrification comme ayant lieu en son sein, tandis que des composantes industrielles considèrent les processus de transformation de l'azote comme ayant lieu dans l'environnement. Cela rappelle le *no man's land* évoqué dans la sous-section précédente au sujet de la catégorie *déchet*.

Cela ajoute deux autres tensions qui se répercutent au sein de la communauté correspondante. Une première concerne ce système technique, qui peut être un ensemble de catégories de classe 3 ou de classe 4. Le statut des EE respectives diffèrent, que ce soit en matière de précision, de vérifiabilité, et donc de crédibilité. Ce qui pose problème dans un domaine qui vise avant tout une utilité par comparaison. C'est ce que relève Hélias (2016) quand il met en avant les différences de traitement en EE de systèmes encore conceptuels, existant tout au plus comme pilote de laboratoire, et des systèmes

industriels optimisés, mais surtout réels. La seconde tension concerne le fait que ces derniers ne trouvent de l'autre côté de leur limite, forcément matérialisée dans l'espace, des entités que l'on ne considérerait pas forcément comme appartenant à cet environnement/nature. L'astuce a toujours été de ne simplement pas la considérer, en se rétractant avec un environnement abstrait dans la classe 4 et en se bornant à parler d'impacts « potentiels », des estimations que l'on ne cherche du coup pas à valider, justifié à l'aide de la finalité relative, non absolue, des exercices. Mais ce traitement inégal entre un objet matériel et un environnement conceptuel non-défini amène de plus en plus de praticiens à tenter de faire correspondre cet environnement, et la poursuite en leur sein des flux « reçus », à une matérialité : la tendance souvent désignée de *régionalisation* ou *territorialisation* de l'ACV, i.e. établir des relations explicites entre flux de catégories 4 et 1. Si la tendance connaît un fort engouement, un fondateur de la première heure comme Heijungs (2012) pointe toutefois l'impossibilité pratique d'une telle ambition et son incompatibilité avec l'objectif comparatif des évaluations.

Il me semble donc pouvoir dire que le focus sur une limite nette et unique entre le système technique et son environnement, relevant forcément de la classe 4, entraîne un résultat d'EE par nature instable. Et même incomplet, dans le sens où cette limite – si l'on s'oblige à la considérer – est multiple (des processus faisant partie d'un système technique peuvent être « naturels ») et que certains impacts que tout un chacun qualifierait comme impact *environnemental* peuvent très bien être produits par des flux à l'intérieur de la limite du système qualifié de *technique*, ou par des changements au-delà de cette limite qui ne relèvent pas de flux de matière la traversant (cf. A-1).

Un dernier point qui découle de la nature « classe 4 » de ces exercices tient à la fois de cette limite abstraite et du terme d'évaluation même. Le focus sur la limite renvoie bien à la vision du monde qui sous-tend la dichotomie, elle-même dépendante d'un système moral, un système de valeurs : toute intervention humaine au-delà est ainsi par définition considérée comme indue (cf. la citation de Mill, à la fin de la raison 4 de mon argumentaire contre la dichotomie, section III.A.1). Tout changement produit par l'homme s'y voit forcément affecter – par l'expert ou le chercheur ! – une valeur plus ou moins négative. La distinction en anglais entre *assessment* – observer et enregistrer un ensemble de paramètres – et *evaluation* – combiner les informations de l'*assessment* pour en tirer des conclusions – paraît, quant à elle, à même de préserver la recherche contre un tel dépassement de mandat. Mais le fait d'opérer dans cet espace de valeurs qu'est la classe 4 paraît rendre le respect de cette différence bien difficile. Et, étrangement, la valeur attachée au changement provoqué dans cet espace où l'homme ne saurait être – et dont on serait donc en droit de supposer qu'il n'affecte pas l'homme – se base dans certains cas très explicitement sur le risque que représente ce changement pour l'homme (le risque toxicologique par exemple). Le terme même de *risque* fait référence à une *exposition*. Or, si cela revient à reconnaître la relativité de cette limite abstraite, ce flux retour dans la « sociosphère » ne fait quant à lui pas l'objet de tentatives de quantification. Et de telles tentatives réduiraient nettement l'utilité pratique de cette limite.

e) *Le pragmatisme : un dernier élément de posture résultant de l'analyse*

Pas moyen d'y couper : la recherche en matière de (co-)conception du recyclage de résidus – ou de la gestion des flux de matières en général – m'entraîne moi aussi, et malgré moi, dans cet espace symbolique, cet espace de valeurs, que je dénomme maladroitement « classe 4 ». C'est bien là un des deux changements radicaux dont Jollivet (2009) identifiait le besoin : aux « *chercheurs en sciences physiques, chimiques et biologiques d'accepter l'idée que la façon dont ils conçoivent la matérialité de*

leurs objets est à la fois ce que celle-ci est en elle-même et une construction sociale ». J'estime que ma conception de l'évaluation environnementale (A-1) – à laquelle je préfère l'intitulé plus modeste « estimation de conséquences environnementales » (section II.D.2), si le maintien de ce dernier terme est estimé utile voire incontournable – évite l'écueil du jugement de valeur auquel n'échappe pas l'EE telle que décrite ci-dessus (cf. la raison 4 de mon argumentaire contre la dichotomie, section III.A.1). Mais cela n'empêche pas que le positionnement du chercheur en sciences exactes comme « acteur parmi les acteurs » au sein de la co-construction l'oblige à clarifier son positionnement dans la philosophie morale⁴⁷ : je me dois donc d'ajouter un second pilier, complétant ma fondation à côté du pilier matérialiste. Comme le formule Maris (2010), « aux chercheurs moraux de se doter de leurs valeurs dans un contexte donné. Il n'existe pas de science de l'évaluation, c'est encore dans le domaine de la philosophie. Et la philosophie démontre que ce serait une science « morale » par excellence ».

Si la question se pose à moi, ce qui justifie que je la traite ici, l'intérêt de l'aborder est bien plus général car la question concerne l'EI et même l'écologie en général. Comme l'indique Deléage (1994) :

Placée au carrefour de savoirs sur la nature comme la biologie et les sciences de la planète, et de sciences humaines comme l'ethnologie ou l'économie, l'écologie est nécessairement polydisciplinaire. Il lui est impossible d'éliminer tout jugement de valeur sur l'objet de son étude. Impossible d'éliminer le point de vue particulier de l'observateur d'où est perçue la réalité vivante, ce qui constitue bien l'écologie comme la plus humaine des sciences de la nature. En cela le parallèle s'impose avec la géographie, la plus « naturelle » des sciences humaines.

Si j'appelle l'écologie industrielle à se réclamer de l'écologie (A-4), elle devrait d'ailleurs bien y être accueillie car l'écologie réclame son « industrialisation » : Lévêque (2013) appelle l'écologie à « présenter le plus objectivement possible les conséquences des actions de l'homme, qu'on les considère négatives ou positives selon nos critères. Elle doit surtout afficher beaucoup plus clairement que les milieux sur lesquels elle travaille sont des systèmes anthropisés. ... afin de travailler dans la perspective d'une meilleure co-évolution (sur la base de critères locaux à débattre) ». « Valeurs » et « critères » rejoignent ici les aspects « interprétation » et « fonction » traités au début de ce chapitre.

La question à laquelle il convient donc de répondre dans ces recherches relève du passage conscient de ce glissement : a-t-on besoin d'interprétation et d'attribuer des fonctions ? Si oui, à quel moment précisément convient-il de passer à cette interprétation ?

Un premier élément de réponse est déjà inhérent à mon analyse car elle reflète une conception subjectiviste. Une conception défendue par Maris (2010) au sujet de l'évaluation de la biodiversité :

On peut valoriser une chose dans la mesure où elle est un moyen pour d'autres fins qu'elle-même. On parle alors de valeur instrumentale. ... Mais on peut aussi penser qu'il se suffit à lui-même, qu'il est une fin en soi, indépendante de son utilité pour d'autres fins : une valeur non-instrumentale. ... Une autre distinction structurante dans les travaux philosophiques sur la notion de valeur interroge leur caractère objectif ou subjectif. Le problème est de déterminer si les valeurs préexistent, dans l'objet même, à toute

⁴⁷ La philosophie morale est, au sens strict et contemporain, la branche de la philosophie pratique qui a pour objet les questions éthiques. Elle porte principalement sur la finalité de l'action et cherche à résoudre les questions qui peuvent se poser dans la délibération et la prise de décision.

évaluation, ou si elles résultent d'une relation entre un évaluateur et un objet évalué. ... Nous nous positionnons en faveur d'une conception subjectiviste, pour laquelle la valeur est toujours d'abord un acte subjectif de valorisation par un évaluateur. ... Un évaluateur attribue une valeur instrumentale ou non-instrumentale lorsqu'il valorise un objet. La notion de valeur intrinsèque, qui relève davantage d'une conception objectiviste des valeurs, sera évitée au profit de celle de valeur non-instrumentale.

Puisque dans la conception subjectiviste *valeur* renvoie à *fonction*, la classe 1 n'est pas concernée. Les catégories de la classe 2 ou les changements dans ces objets peuvent être évalués selon une conception objectiviste (sans que ce soit de l'écocentrisme). Mais les classes 3 et 4 sont clairement concernées par l'évaluation subjectiviste (instrumentale et non-instrumentale [dont morale]), ce qui me ramène d'ailleurs à un élément dont je me suis déjà réclamé dans mes activités portant sur l'EE (A-1) : l'anthropocentrisme faible de Norton (1984) que Maris (2010) décrit de la manière suivante :

B. Norton considère que les éthiques non-anthropocentrées n'ont guère été utiles. ... L'opposition entre l'anthropocentrisme et le non-anthropocentrisme relèverait principalement, selon Norton, d'une conception trop étriquée des intérêts humains. A un anthropocentrisme fort, qui ne tient compte que des valeurs d'usage des entités naturelles, il oppose un anthropocentrisme faible, dans lequel les intérêts humains sont envisagés dans un sens beaucoup plus large, comprenant également les valeurs esthétiques, spirituelles, et morales des entités naturelles, et qui, de surcroît, accorde une grande attention aux intérêts des membres des générations futures. ... Ce choix repose en grande partie sur l'idée qu'il serait, d'après lui, plus facile de convaincre et de motiver les gens sur la base de leurs propres intérêts bien compris, ou à la limite ceux des êtres humains actuels et à venir, que de s'appuyer sur des thèses aussi fortes que les thèses non-anthropocentristes. ... Pour le pragmatisme, les valeurs ne sont pas des entités abstraites, fixées une fois pour toutes dans le ciel des idées. Elles sont, par essence, des actes d'évaluation, et n'existent donc pas en dehors de l'esprit de celui qui évalue. Cette conception s'accorde avec le parti pris que nous avons adopté de ne considérer les valeurs qu'en tant qu'actes subjectifs de valorisation.

Maris classe Norton parmi les auteurs qui ont récemment fondé ce qu'elle désigne comme *le pragmatisme environnemental*. Tout comme le matérialisme, le pragmatisme est une philosophie pratique : la branche de la philosophie qui a pour objet les actions et activités des hommes. La fin fondamentale et ultime de la philosophie pratique est le bien-vivre ou bonheur (l'épanouissement). Elle ne porte donc pas sur des problèmes spécifiquement théoriques ou sans intérêt pour notre action et pour notre vie. Le pragmatisme ne se soucie pas de métaphysique, ou plus précisément, considère que c'est dans l'expérience et la réalité empirique que tout se joue : la vérité, la morale, la justice. C'est là une attitude qui contient une résonance particulièrement intéressante avec la question posée ci-dessus. Comme j'estime que l'attribution de fonctions relève souvent d'*interprétation*, j'adopte la thèse du pragmatisme selon laquelle la vérité n'existe pas *a priori*, mais elle se révèle progressivement par l'expérience. Selon la perspective pragmatique, penser une chose revient à identifier l'ensemble de ses implications pratiques, car seules ses implications confèrent un sens à la chose pensée. Il s'agit d'une pensée radicalement empiriste : la notion d'effet pratique est étroitement liée à la question de savoir quels effets d'une théorie sont attendus dans l'expérience. Mais là où l'empirisme se fonde sur l'expérience, le pragmatisme se fonde sur l'action. Connaître n'est pas voir, mais agir. Les pragmatiques

n'ont pas une vision contemplative de la connaissance, ils se focalisent plutôt sur les manifestations pratiques. C'est ainsi que pour C.S. Peirce (1879) le pragmatisme est synthétisé dans ce qu'on appelle la maxime pragmatique : « *Considérer quels sont les effets pratiques que nous pensons pouvoir être produits par l'objet de notre conception. La conception de tous ces effets est la conception complète de l'objet* ».

Cette thèse où la vérité n'existe pas a priori et où connaître est agir m'ouvre une porte de sortie : il n'y a lieu de qualifier des relations de « fonctionnelles » qu'une fois que l'effet pratique produit par l'action les révèle comme l'étant. Le pragmatisme constitue aussi un fondement de la recherche post-normale et de la gestion adaptative. Pas besoin donc de construire ou d'adopter un cadre général d'interprétation subjectiviste, mais le besoin de réévaluer les principes et d'arbitrer entre eux dans chaque situation concrète. Une attitude qui me paraît particulièrement en phase avec mes travaux récents. Pour John Dewey (1859-1952), un autre fondateur du pragmatisme, les valeurs sont des outils pratiques, dont se dotent les individus et les groupes sociaux pour faire face aux problèmes qu'ils rencontrent : aux chercheurs moraux de se doter de leurs valeurs dans un contexte donné (Maris, 2010).

J'estime par-là justifier ce qui est implicite dans ce choix : le fait de violer la loi de Hume. Une justification, je le rappelle, qui était absent dans le cadre moral véhiculé par la dichotomie Nature – Société. Mais cela ne me libère pas de l'obligation qui résulte de ce choix : de préciser jusqu'où je m'estime légitime d'aller dans cette violation. Aiken (1956) me fournit une clé pour résoudre le conflit avec le principe déduit de ma critique de la dichotomie (une posture libre de toute considération morale et éthique, cf. l'introduction de cette section III.A.2) dans l'introduction de son ouvrage sur la philosophie du siècle succédant celui de Hume :

In the 19th century philosophers come increasingly to recognize that objectivity is not so much a fact about the universe as it is a matter of common standards of judgments and criticism. Objectivity, in short, is now conceived as inter-subjectivity. Inter-subjective norms are not agreed to by members of a society because they are objective, but, in effect, become objective because they are jointly accepted.

The business of morality or practical reason is to guide us in making decisions. Practical or moral reasoning is addressed to the removal of irresolutions of the will. Such indecisions, Kant thinks, are of two sorts: (a) those which arise from ordinary conflicts of desires or inclination, and (b) those which arise from conflicts between natural desires or inclinations and our sense of duty. Answering to those two very different types of practical indecision there are two main types of imperative: (a) "hypothetical imperatives" which tell us what we must do if we wish to satisfy our desires, and (b) "categorical imperatives", which tell us what, as moral beings, we ought to do.

La recherche qui, forcément à partir de connaissances issues de l'observation, s'exprimerait sur des impératifs catégoriques – comme, parfois, des analyses qui s'appuient sur la dichotomie Nature-Société – violerait de manière inacceptable la loi de Hume. C'est du ressort des autres acteurs (et de leur cadre moral) de tout territoire que la recherche serait amenée à investir : les impératifs catégoriques intersubjectifs s'imposent à elle. Elle est par contre légitime pour s'avancer sur des impératifs hypothétiques (« afin de ceci il convient de faire cela »). Et dans le cadre de l'anthropocentrisme faible de Norton il lui revient de questionner l'intersubjectivité des impératifs

hypothétiques avancés par d'autres⁴⁸. Libre ensuite à moi, chercheur, d'interpréter la fonctionnalité des flux dans le cadre posé par ces impératifs. Et en fonction de la nature des valeurs révélées on peut ensuite projeter les choses évaluées dans la classification binaire de la dichotomie restant confinée à la Classe 4. Ce qui permet le cas échéant de retrouver les « services écosystémiques », les « externalités à internaliser » – ou justement déjà internalisées – et les « impacts environnementaux ».

⁴⁸ Contrairement à l'anthropocentrisme « fort », l'anthropocentrisme faible de Norton (1984) « *goes beyond the satisfaction of felt preferences of human individuals – desires and needs insulated from any criticism or objection – seeking to encompass all considered and rationally assessable preferences. A considered preference is any desire or need that a human individual would express after careful deliberation, including a judgment that the desire or need is consistent with a rationally adopted world view.* »

B. Problématique et objectifs de recherche

L'analyse de la section précédente montre à quel point nos concepts, notre conception du monde, sont dépendants de la dichotomie qui les sous-tend. Et à quel point l'abandon de cette dichotomie met à « nu » le monde, ce Gaïa « réinterprété » par Latour. Tant de concepts *universels* qui se révèlent être des façons particulières de voir le monde. Où « voir » souligne leur nature abstraite, leur appartenance au monde symbolique dont le lien avec l'actualité matérielle est souvent plus supposé que démontré. Mais ce n'est pas pour son intérêt propre que j'ai conduit cette réflexion. Ce n'était pas une fin en soi. Je l'ai annoncé comme instrumentale, un passage que je ressentais comme obligé. Bien que la section correspondante contienne certaines leçons, je ne peux toutefois vous demander d'accepter ou du moins comprendre les choix de posture tant que je n'en ai pas tiré les conséquences pour moi-même, ce qui fait l'objet de la présente et ultime section.

Mon analyse m'a conduit au rejet de la dichotomie, ou plus précisément à son cantonnement à la classe 4 des abstractions, les catégories symboliques, ainsi qu'au constat de conflit avec la façon de séparer la matérialité dans les recherches « intégrées » s'intéressant à l'action de l'homme parmi les forces d'agir. J'estime aussi avoir démontré que, contrairement à l'intuition induit par son évidence apparente, la dichotomie se révèle toujours peu utile à l'écologie industrielle et à l'évaluation « environnementale »⁴⁹, et souvent contreproductive en induisant la définition de problèmes mal posés. Je pense aussi pouvoir conclure que la conception de mon implication (tout comme celle du collectif que constitue notre unité) dans la démarche participative (section II.D.1.b) et la base logique adoptée pour l'évaluation (section II.D.2.a) sont en phase avec la posture déduite (III.A.2). Sans que le cantonnement de la dichotomie à la classe 4 y soit revendiqué, il y est implicitement assumé : nous acceptons de porter nos connaissances « objectives » telles des visions particulières à défendre au sein des arènes de concertation ; et le cadre de l'évaluation accepte toute(s) le(s) dichotomie(s) sans la/les imposer à la recherche RORAL (section II.D).

C'est surtout dans le « ventre mou » de la recherche RORAL que la posture matérialiste (et pragmatique) déduite induit encore du travail, ce cœur positiviste entre la recherche empirique (à gauche dans la Figure II.14, p66) pour qui elle va de soi et la démarche constructiviste qui s'en passe. Un travail dont le but est d'aboutir à des analyses et des représentations des métabolismes (de *systèmes* que l'on revendiquera *industriels* ou *territoriaux*) qui respecteraient leur conception matérialiste (A-4) et qui seraient aptes à informer les processus participatifs prétendant à la « symbiose industrielle facilitée » (Boons et al., 2016; Paquin et Howard-Grenville, 2012). L'ensemble devant ensuite permettre d'atteindre l'objectif indiqué par le titre de ce mémoire : évoluer « **Vers une écologie territoriale des résidus organiques** ». Un titre qui véhicule plusieurs idées :

- La formule « écologie de ... » est commune en écologie, mais très rare en écologie industrielle qui ne se définit que comme une analogie de l'écologie « véritable » car concernée par des systèmes anthropiques. On trouve quelques exemples (... de métaux ; de papier et bois), mais qui ne concernent pas sa variante « territoriale », terme pourtant si écologique. « écologie territoriale de ... » constitue une indication de la proposition du projet consistant à explorer la conception de l'écologie territoriale comme appartenant à la recherche écologique, conforme

⁴⁹ Le rejet même de la dichotomie et ma posture matérialiste rendent l'emploi des guillemets obligatoire.

aux thèses défendues par des fondateurs comme Tansley et Vernadski et conforme à son paradigme actuel de la co-évolution (A-4) ;

- « écologie territoriale des ... » traduit l'idée qu'au-delà de la considération exhaustive des flux de matières et d'énergie d'un territoire telle que d'usage dans la pratique dominante de l'écologie territoriale, de type diagnostic (des MFA tel que dans e.g. Barles, 2009), il peut être pertinent pour l'écologie territoriale prospective, la recherche action, de focaliser sur un sous-ensemble du « système » territorial (cf. la sous-section suivante III.B.1). Et que la démarche peut être générique pour ce type de sous-système, et que ladite démarche peut être mobilisée sur des territoires ciblés pour l'importance connue des enjeux que ce sous-système y représente, sans qu'un diagnostic exhaustif et détaillé soit requis ;
- L'écologie territoriale étant anthropocentrée, l'adjonction « des résidus organiques » derrière ce terme pointe vers un des principaux liens entre l'homme et la terre, le sol, et la nécessité de restaurer ce lien « métabolique » en grande partie « rompu » (Foster, 1999; Foster et Burkett, 2000; Moore, 2011, 2000), un impératif hypothétique pour le développement durable des territoires ciblés ;
- Comme la formule « écologie de ... » n'est en écologie qu'appliquée au vivant, « écologie des résidus organiques » constitue un appel au respect de l'ampleur du domaine de l'écologie, trop souvent réduit à sa part biologique. L'agro-écologie reconnaît quant à elle d'ailleurs parfaitement la gestion des cycles biogéochimiques comme une de ses principales dimensions (Duru et al., 2015; Wezel et al., 2009)⁵⁰. Au travers de la revendication de l'appartenance de l'écologie territoriale à l'écologie, ce titre constitue par là aussi une revendication de « l'écologie territoriale des résidus organiques » comme une « agro-écologie territoriale ».

La question de recherche qui est centrale et commune à la diversité de travaux qui visent ces objectifs est la suivante :

Comment gérer les *résidus organiques* d'un *système territorial* pour que ceux-ci deviennent des *matières* participant aux cycles de la manière la plus utile ?

Cela reflète un positionnement quelque peu schizophrène, semblable à celui du chercheur en sciences sociales qui *facilite* un processus de co-construction tout en *l'observant*, prenant ce processus pour objet de recherche. Ici il s'agit d'un chercheur qui *participe* à ce processus participatif facilité tout en *étudiant* l'actualité matérielle qui le sous-tend : « gérer » et « résidus » renvoient à ce processus dans l'espace symbolique. « Système territorial » aussi, mais c'est ce *boundary object* « territoire » qui constitue un concept instrumental pour assurer justement le lien avec l'actualité des « matières » et leurs « cycles », et où « utile » renvoie à cet effort de traduction inverse (vers la « construction sociale », cf. Jollivet 2009) guidé par le pragmatisme que je continuerai d'assurer et de développer. La schizophrénie s'étend au « comment » en y répondant deux fois : au chercheur de développer d'abord sa propre vision de la réponse, sa *promesse plausible* ouvertement partielle, puis de la (re-)co-construire.

Et l'hypothèse qu'en tant que participant je chercherai à vérifier – et faire vérifier – dans les situations réelles où nous, le collectif Recyclage & risque, choisirons de nous investir est la suivante : La gestion

⁵⁰ Voir aussi la note de positionnement des recherches de l'Inra et du Cirad, octobre 2016 : <http://www.cirad.fr/content/download/11293/132717/version/3/file/Agro-ecologie-INRA-CIRAD-note-longue.pdf>

qui organise, parmi d'éventuelles autres étapes, un passage des matières (d'origine résiduaire) par le sol cultivé constitue le meilleur compromis entre les coûts et bénéfices que génèrent les devenir des résidus organiques. C'est là notre *impératif hypothétique* (III.A.2.e). Et nous ne pouvons envisager agir (faire des recherches selon le cadre du pragmatisme) seulement là où cet impératif rencontre un écho, ce qui renvoie au choix des lieux d'intervention (sous-section III.B.1.d), évoquant aussi la question du système alimentaire). Un objectif spécifique reste ensuite toujours à établir dans ces situations d'étude : *l'impératif hypothétique intersubjectif* résultant de l'ensemble des préférences considérées (Norton, 1984) des acteurs. C'est ce qui devrait constituer le point de départ pour le développement de la promesse plausible (II.D.1).

1. Proposition d'objet(s)

J'ai déjà argumenté et tenté de démontrer l'intérêt du positionnement double, évoqué ci-dessus comme schizophrène, dans les sections II.D et III.A.2. Du côté du constructivisme participatif il s'agit principalement d'un travail de traduction, ce *boundary work* (Mollinga, 2010) déjà évoqué (AS-1, section II.D.1.b), déjà largement abordé par les travaux réalisés, même si plusieurs aspects constituent encore des perspectives de recherche (abordées dans la section III.B.2 de proposition de méthode). Mais « traduction » de quoi !? Sous ma posture matérialiste je récuse la réification si fondamentale à la dichotomie de tout système autre que ceux auxquels renvoient les catégories de classe 2 (Tableau III-1). Mais dans la perspective de traduction il me faut accepter, dans les mots d'Ison, un « système comme épistémologie », que d'autres peuvent voir comme ontologie, et lui faire correspondre une réalité matérielle à étudier. Il s'agit ici d'exposer comment la posture matérialiste et pragmatique permet de respecter ce principe déduit de ma critique de la dichotomie : définir explicitement le cadrage et la conceptualisation des objets retenus comme outils épistémologiques de mes recherches. J'aborde ensuite les cadrages thématiques et géographiques qui me semblent pertinents, mais ce sont là des sujets où je suis loin d'être seul à décider.

a) Cadrage conceptuel

Ce que je me propose d'explorer dans mes prochains travaux est l'inversion de la démarche décrite pour la recherche dite « intégrée », où l'on décide d'abord d'une répartition des catégories d'intérêt de classe 4, avant de retourner étudier une réalité matérielle prématurément circonscrite assimilant les objets empiriques aux objets mentaux (section III.A.2.b). Il s'agirait de **partir de la réalité matérielle seulement circonscrite par la question de recherche**. Pour celle indiquée ci-dessus, cela correspond à tracer un système métabolique, sous-ensemble du réseau métabolique (A-4), à partir des principales productions de résidus organiques (formulé de manière plus générique comme les « activités problématiques » dans la Figure III.4) en un « lieu » (ici « à excès structurel de PRO ») donné, estimé pertinent par rapport à leur gestion, donc limité aux matières « gérées ». Un traçage évolutif, en fonction de l'évolution de ce jugement. C'est ainsi que dans mes dernières propositions de projet, j'ai inclus une phase préliminaire de « diagnostic » qui inclut la délimitation du territoire comme une activité de recherche, évitant ainsi de la poser d'emblée comme donnée, telle une évidence indiscutable : une façon de produire, ou révéler, le territoire, avant de l'activer (O-1)⁵¹. Je reconnais

⁵¹ Bien que territoire soit une catégorie symbolique, il permet d'approcher une réalité matérielle sans cadrage réductionniste préconçu. C'est un point important car il me semble qu'en s'efforçant de se l'appropriier, les positivistes l'acceptent

ainsi comme une démarche épistémique déterminante l'étape trop souvent ignorée, passée sous silence, traitée partiellement et caractérisée par un flou persistant dans sa forme classique, de circonscrire une réalité matérielle à partir d'objets mentaux, qui seraient eux le centre de l'intérêt. L'écologue industriel verrait ainsi d'abord, et exclusivement tant qu'il se trouve dans le domaine positiviste, la matière – catégories de classe 1 – « derrière » les « choses » – catégories de classe 2 et 3 – qui font l'objet du projet d'action. Une telle approche le distinguerait de celle des autres pratiquants de la « recherche intégrée », souvent influencée par la dichotomie, dont l'agronome, et l'oblige à poser provisoirement les limites du suivi pour chaque matière déclarée d'intérêt, composant son ensemble de systèmes métaboliques épistémiques spécifique à la situation d'étude. Elle lui procure la neutralité et l'objectivité auxquelles il prétend, avant d'engager sa connaissance obtenue dans l'établissement de l'intersubjectivité. Si par exemple l'eau était une matière d'intérêt, il s'agit de ne pas limiter sa considération à la matérialité derrière l'eau « ressource », sous sa forme liquide et libre (comme e.g. l'économiste ou en sciences de l'environnement), mais de la suivre au travers d'un sous-ensemble de réseau métabolique composé d'objets (e.g. plante, fruit) interprétés par ailleurs comme correspondant à des « produits », des « déchets », etc.

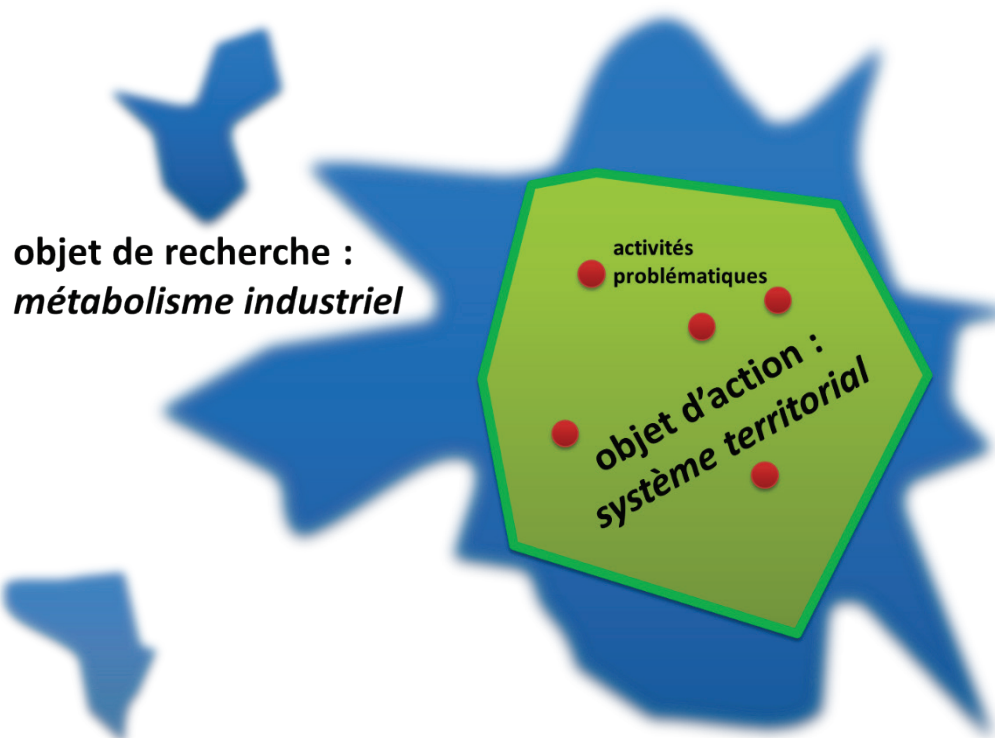


Figure III.4 Schéma illustrant le cadrage conceptuel, à partir des activités problématiques (points rouges) ayant attiré l'attention sur le lieu, du système d'action, objet de la démarche participative (ensemble vert à bordure nette), et le métabolisme industriel, objet(s) de l'étude des flux de matière (ensemble bleu à bordure floue).

généralement comme constituant une réalité matérielle (généralement une portion de la surface terrestre dont la taille se situe dans une gamme donnée, avec l'activité qui s'y déroule, posé d'emblée comme cadre de la recherche, souvent sans véritable justification). Nos travaux à la Réunion ne font pas exception à cette « règle ». Dans O-1 nous insistons sur le fait que la notion n'a pas d'acceptation unique : si cela peut être ressenti comme un handicap, c'est à mon sens une valeur. Selon la perspective pragmatique, penser le territoire revient à identifier l'ensemble de ses implications pratiques, car seules ses implications confèrent un sens à la chose pensée.

Il convient de noter qu'il s'agit d'un cadrage en deux temps qui débute par la circonscription de l'objet de l'action, qui ne coïncide pas nécessairement avec l'objet des recherches (Figure III.4). Si ce « système territorial », cet ensemble cohérent d'activités *fonctionnelles*, est bien l'objet de travaux de « traduction », la recherche matérialiste étudie une réalité matérielle, sans classement ou cloisonnement préconçu ni fonctionnalité interprétée, qui se révèle, conforme au pragmatisme, par l'action du système territorial : le focus passe ici de l'action aux flux de matière, induits par, mais aussi ré-agissant à/sur l'action ! La limite spatiale/matérielle de la réalité étudiée n'est pas *donnée*, mais *résulte* de la matérialité affectée par cet ensemble agissant ; où la nature (systémique ou en cascade) et le degré de cette affectation induit une décision quant à la *fonctionnalité* du lien dans le système territorial. Voilà un point de départ pour opérationnaliser la délimitation à laquelle appelait implicitement Scholz (2011), seul au sein des « dichotomiciens » à reconnaître un *reste du monde* au-delà de l'environnement : sans fournir de piste pour opérationnaliser la distinction, il estime que ce *reste du monde* comprend tout ce qui est « *judged irrelevant for the human system under the timespan considered for both the social and material worlds. The environment thus represents that which matters or is of interest from a certain perspective.* » Le métabolisme industriel est un espace fonctionnel continu, mais dont la matérialité géographique correspondante ne l'est pas forcément. Un objet bien différent de celui de ceux qui étudient le métabolisme par MFA (III.A.2.c) : on s'intéresse aux processus de changement révélés, au lieu d'un bilan matière focalisant sur la limite d'une boîte noire préconçue (et ne considérant pour une matière donnée, comme dans le cas de l'eau, souvent seulement certaines de ses formes). Au-delà de son faible intérêt, un tel bilan est impossible à établir au sein d'un métabolisme dont la géométrie varie en fonction des flux de matières⁵² ! Et cela permet aussi d'éviter le problème auquel est confronté la régionalisation ou territorialisation de l'ACV qui, en tentant de faire correspondre l'environnement à une matérialité, se borne à considérer ce qui se passe dans une partie prématurément isolée de la réalité (III.A.2.d).

Notons aussi qu'ici la limite spatiale dépend des flux de matière étudiés, ce qu'illustre le flou de la Figure III.4. La déduction du système territorial induit une limite unique et univoque, même si elle peut évoluer, en termes d'activités humaines, mais aussi en termes de la matérialité correspondante : le réseau routier, les équipements, les installations, les parcelles, etc. Le métabolisme industriel⁵³ est la matérialité affectée par cet ensemble agissant. Il ne s'agit donc pas de *toute* la dynamique matérielle d'un territoire – d'où la préférence pour le terme métabolisme *industriel*, au lieu de *territorial*. Mais spatialement cette matérialité peut dépasser la limite établie pour le système territorial, car celle-ci ne la concerne pas. Ce sont des conséquences matérielles qui du point de vue du système territorial seraient donc perçues comme des *externalités*, qui peuvent quant à eux être qualifiées d'économiques ou comme étant relatives à l'environnement global ou celui des habitants (A-1). Cela induit des questions méthodologiques, notamment en termes de simulation, que j'aborderai par la suite. Et

⁵² On peut en plus considérer les limites suivantes :

- les *materials* ne couvrent pas toutes les matières du bilan ;
- il n'existe pas – et ne peut pas être imaginé – un système de catégorisation exhaustive et mutuellement exclusive des « materials » en termes de « matter » contenu, qui est ce à quoi le principe du bilan se réfère ;
- la MFA ne considère la *matter* seulement tant qu'elle constitue *material*, car dès qu'elle ne la constitue plus elle est considérée comme avoir quitté l'économie/société (cf. Brunner et Rechberger, 2004 : « *An MFA delivers a complete and consistent set of information about all flows and stocks of a particular material within a system. Through balancing inputs and outputs, the flows of wastes and environmental loadings become visible, and their sources can be identified* »)

⁵³ Conformément à ma définition « human mediated matter change for sustaining a productive system's economic activity » (A-4)

n'interprétez pas le schéma de la Figure III.4 comme une matérialité sous-jacente à l'activité humaine : ce serait retomber dans les travers de la dichotomie ! Le système territorial dispose de sa propre matérialité, inclus quant à elle dans le métabolisme industriel, qu'il s'agisse des flux intentionnels ou des changements induits sur cette matérialité-là – l'environnement métabolique (A-1) – car tous perçus et acceptés comme étant *fonctionnels*.

Un autre point clé du cadrage conceptuel émerge du focus sur les processus de changement : l'importance de la considération du temps ! Rien de plus compatible avec la posture matérialiste et pragmatique. Et c'est aussi un effet de ma conception du métabolisme qui amène à questionner une autre dichotomie : celle entre le biotique, que l'on situe souvent dans « l'environnement naturel », et l'abiotique, admis quant à lui dans « l'environnement non-naturel » de l'homme. Il s'agit de matière *animée* vs matière *inanimée*, mais c'est la même matière, et qui dans nos flux passe par les deux en étant toujours animée... Ce qui rappelle le point de vue du philosophe Alfred North Whitehead (1861-1947) qui contestait la perspective selon laquelle certaines parties de la nature sont mortes, un point de vue qu'il identifie avec une perspective de bon sens scientifiquement discrédité, mais qui n'aurait jamais vraiment quitté l'esprit des scientifiques. Whitehead soutenait que la réalité consiste en des processus plutôt que des objets matériels, et que les processus sont mieux définis par leurs relations avec d'autres processus, rejetant ainsi la théorie selon laquelle la réalité est fondamentalement construite par des morceaux de matière qui existent indépendamment l'un de l'autre. La *philosophie de process* de Whitehead soutient que « *il est urgent de voir le monde comme un réseau de processus interdépendants dont nous sommes partie intégrante, de sorte que tous nos choix et nos actions ont des conséquences sur le monde qui nous entoure* » (Mesle, 2008). Des propos d'une actualité renouvelée pour la génération Anthropocène (voir e.g. le Gaïa de Latour, 2015) et en phase avec la *vision du monde comme un réseau métabolique* que je propose pour l'écologie industriel (A-4). Nous avons déjà souligné cette importance du temps comme un des facteurs clé de la perception humaine des conséquences environnementales (A-1), ce qui reflète le fait que la distinction entre un « impact » et son absence relève d'un seuil subjectif appliqué à une *intensité* de changement, défini par un couple ampleur-temps. Il s'agit désormais d'aller plus loin et de chercher à respecter cela dans l'étude même de l'objet de recherche : Il n'y aurait ainsi plus de flux entre « stocks », mais exclusivement des flux (de matière passant par et *au travers* d'objets), plus ou moins rapides ou lents, et des « photographies » de situations instantanées de la dynamique. Le respect de cela dans les travaux de représentation (modélisation) permettrait de produire les passages appropriés entre la réalité matérielle et la sphère d'interprétation : les indicateurs (Figure II.17). Son respect dans les travaux d'analyse constituerait une aide à la délimitation du sous-ensemble métabolique d'étude : il ne s'agit pas de distinguer entre liens « fonctionnels » dans l'absolu et ceux qui ne le sont pas, mais de reconnaître que c'est l'intensité du lien qui constitue un élément de la décision. Pour revenir à l'exemple de l'eau : une masse d'eau donnée, vu comme « ressource » donc statique, n'est pas écartée de l'analyse parce qu'elle ne serait pas impactée par le projet d'action (e.g. un flux de contaminants), mais soit parce qu'un changement s'approchant d'un niveau « impact » (pollution) mettrait trop de temps à se produire, soit parce que d'autres dynamiques (e.g. renouvellement de l'eau) annuleraient le changement induit par ce projet.

b) Cadrage thématique : vous avez dit « matière » ?

Le cadrage conceptuel proposé renvoie à la question de recherche dont deux aspects restent à être considérés. L'un tient de l'objet de recherche et l'autre de l'objet d'action : en mettant les flux de

matières au centre je n'ai pas levé toute l'ambiguïté sur l'objet de recherche, car même la catégorie *matière* n'en est pas dépourvue. Et dans une situation d'action donnée, la restriction de l'objet d'action aux résidus organiques peut être jugée insuffisante.

Le propos de Whitehead renvoie à la distinction en anglais entre *matter* et *material*. Lui se référait au *matter*, comme je le fais dans la définition du métabolisme que je défends, qui inclus l'énergie. Or, en écologie industrielle les deux termes sont très largement considérés comme interchangeables. Plus précisément, on y distingue quelque peu *substance* et *material*, prenant *substance – a particular kind of matter with uniform properties* – pour *matter* lui-même – la matière qui *occupies space and possesses rest mass*. La distinction a son importance, tout comme le fait que sa traduction en français la déplace : on revient à l'importance du *living in language*...

Material flow analysis (MFA) étudie les « flux de ressources physiques au travers de l'économie » (e.g. OCDE, 2008). La MFA est clairement issu du domaine économique et peut donc s'appuyer sur des bilans commerciaux, mais, comme observé précédemment, la MFA ne peut prétendre établir des bilans de masse car elle ne « suit » pas toute la *matter* dont ses *materials* sont faits. Et *material*, donc la MFA, s'appuie clairement sur la dichotomie nature-société, car dès que, et seulement si, un *matter* devient d'intérêt faisant ainsi l'objet d'un transfert mental de la nature vers la société – un *input* potentiel – elle devient *material* (cf. e.g. la figure 1.1 dans Brunner and Rechberger, 2004). Brunner (2012) le reconnaît quand il défend la *substance flow analysis* (SFA, dont je me suis réclamé dans A-5) comme un « *key tool for effective resource management* » : puisque s'intéressant aux matières physiques (« éléments ou molécules », donc plutôt *matter* que *substance*), sa base physique constituerait un « *backbone for evaluation systems and the possibility of complete transparency* ». Ce qui est jugé important car « *resource management involves social processes. ... Thus, to supply transparent, impartial, and reproducible information is essential for effective resource management.* » Je ne peux qu'être d'accord, mais la restriction de *substance* à *ressource* est franchie un peu vite, même s'il convient de souligner la reconnaissance, rare et non remarquée, du fait que les « *Primary resources are anthropogenic constructs—society defines resources based on existing knowledge.* » Où la dichotomie nous est présentée sous la forme de ressources *primaires* et *secondaires* : « *First-order resources comprise primary resources from the geosphere (water, air, soil, minerals, solar and fossil energy) and the biosphere (species and biodiversity). These primary (natural) resources are transformed into secondary (man-made) resources* ». L'application croissante de la SFA aux ressources de *second ordre*, avec en ligne de mire les bilans matière au sein de cette *société*, y est présenté comme une avancée importante. J'estime que le cadrage conceptuel que je propose ci-dessus est mieux posé et plus à même de fournir ces informations acceptées comme *transparentes* et *impartiales* (voir aussi III.A.2.c). Mais par ces propos-là Brunner souligne lui-même que la MFA n'est pas compatible avec la vision du métabolisme industriel que je défends (A-4).

Alors, ces objets de nos recherches matérialistes, donc avant de passer à la considération des valeurs, est-ce que ce sont des instances de *matter* ou de *material* ? En anglais on bascule vers *material* dès qu'il y a allusion à un usage (et donc à une fonction) : *matière première* = *raw material* ; *matière synthétique* = *synthetic material*. Et dès qu'il n'y a plus de perspectives d'usage, l'anglais retourne à *matter* : *waste* peut se dire « *waste matter* », mais non pas « *waste material* » ; *Faeces* se dit aussi « *faecal matter* » ; et bien sûr notre *organic matter* ! Dans mon cadrage conceptuel ci-dessus le focus de l'écologue industriel est clairement sur la *matter*, limité aux catégories de classe 1, mais il considère pour le suivi des flux les *materials* de classes 2 et 3. Contrairement à son usage dans la MFA, *material*

n'est bien sûr pas toujours employé au sens de l'abstraction extensive dépourvue de réalité matérielle... En français la situation est différente. La notion d'usage dans *material* renvoi plutôt à *matériau* quand le domaine d'utilisation est précisé (e.g. matériaux de construction), et à *matière* quand ce n'est pas le cas (matière première) qui du coup inclut aussi le *matter* (Figure III.5). Le domaine couvert par le terme *matière* correspond donc mieux que les termes anglais à la réalité matérielle qu'étudie l'écologie industriel et nous « libère » de la dichotomie anglaise. Mais cela pose le problème de la communication internationale ultérieure et, surtout, passe sous silence une dissonance à laquelle il conviendrait de faire face. Dans le domaine de mon unité de recherche, le propos de mon collègue Jean-Marie Paillat l'illustre : « *La classification des résidus organiques est souvent importante pour les acteurs, mais elle ne veut pas dire grand-chose lorsqu'on décrit les processus biophysiques qui impliquent une continuité entre les classes et non la discontinuité 'pratique'* » (propos oral, mais voir aussi la note 61). Puis, bien que leur domaine soit restreint, des *matériaux* aussi restent à être considérés (tels e.g. les engrais dans le cadre du projet GIROVAR). Reste aussi que dans l'usage il n'existe pas de règle précise pour départager l'emploi de ces deux termes là.

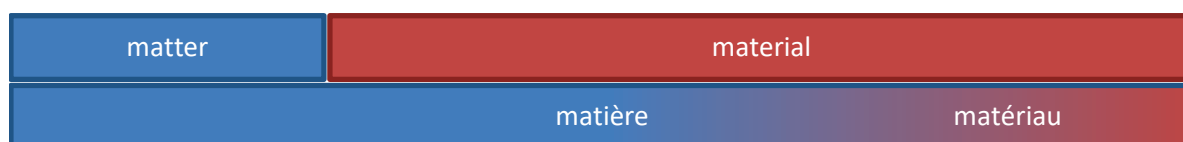


Figure III.5 Comparaison schématique de la distinction matière – matériaux en anglais et en français.

Un autre constat s'impose quand on tente d'établir, au sein de la réalité matérielle, l'inventaire des matières à étudier, suivre et représenter. La taxonomie du règne du vivant a mobilisé moult scientifiques, mais personne ne s'est occupé du « règne des matières » en général, hormis les séries chimiques qui composent le tableau périodique : pas de taxonomie des matières, ni même de typologie des matières ! Et l'on comprend pourquoi dès que l'on tente d'en proposer une : même la distinction la plus élémentaire, celle entre matière minérale et matière organique, pose déjà problème. Un problème que l'on retrouve du côté des matériaux, un ensemble qui dispose quant à lui d'une classification qui semble assez largement acceptée, en quatre ou cinq classes de base, ou « familles » : matériaux organiques, matériaux minéraux, matériaux métalliques, matériaux composites (et parfois matériaux plastiques). Clairement, ces classes ne se situent pas toutes au même niveau et ne sont pas mutuellement exclusives d'une manière univoque, et sont donc en conflit avec ce critère de Congalton (1991, et note de bas de page 4). La classification résulte de l'emploi de deux types distincts de critères pour tenter de justifier des classes en réalité préconçues et subjectives : un type de critère chimique (la structure atomique et moléculaire) et un type de critère qualifiant la nature ou l'origine, chaque type étant censé dissiper le flou laissé par l'autre. En plus la hiérarchie entre les deux types dépend du *couple* de classes à distinguer, et non pas d'une classe elle-même. Etant de même nature, la distinction entre métal et minéral se fonde ainsi sur la structure atomique (liaison métallique versus liaison covalente ou secondaire), tandis que les classes minéral et organique partagent beaucoup de catégories à liaison covalente. On assortit la dernière distinction du coup d'un critère moléculaire (les chaînes de carbone), mais aussi d'origine (végétale, animale ou synthétique pour l'organique). Puis là où l'on distingue une classe « plastique », ce dernier type d'origine (synthétique) permet de l'« extraire » de la classe organique sur un seul critère d'origine ! Et même ces distinctions-là ne

permettent pas toujours l'attribution conforme au classement préconçu. Que penser par exemple des coraux ou les squelettes calcaires ou siliceux, considérés (et exploités) comme s'ils furent « minéral », mais satisfaisant en tout point les critères de l'organique ?

Cette simple observation-là nous met devant l'impossibilité de circonscrire de manière rigoureuse l'ensemble de matières constituant l'objet thématique de nos recherches en partant d'en bas, de l'ensemble des matières. Le seul système de référence bien posé (et permettant des bilans de masses, si l'on estimait cela important) serait le tableau périodique lui-même, mais en ne considérant la matière que comme un ensemble d'éléments on passerait à côté d'un très important nombre de catégories, de matières, d'intérêt. Il suffit de regarder les travaux présentés dans la partie II.D et ceux de mes collègues pour s'en rendre compte.

En dernier lieu il me faut aborder la possibilité du cadrage thématique à partir de l'objet de la question de recherche. Bien que ce sur quoi nous souhaitons agir, au sein de l'objet d'action, soit désigné par la catégorie *résidu organique*, celle-ci ne peut constituer le cadrage thématique de mes recherches. *Résidu organique* est un cadre qui serait :

- **insuffisant** : comme le montrent mes travaux à la Réunion, la comparaison de scénarios et les conséquences induites ou évitées amène à s'intéresser à des catégories autres qui ne sont ni résidu ni organique, telles e.g. les engrais dit *minéraux* ou *de synthèse* ;
- **insuffisamment rigoureux** : en tant que sous-catégorie de la catégorie *matière organique* elle souffre des mêmes ambiguïtés que celle-ci. Et de la même limitation, consistant à faire sortir du champ toute matière dès qu'elle perdrait ce statut organique. Une situation d'ambiguïté aggravée par le fait que d'autre part la catégorie donne la priorité au terme *résidu* par rapport à celui d'*organique* : pour la sous-catégorie compost il est ainsi admis que celui-ci ne peut comporter que 60% de *matière organique* en poids sec, et 25% en poids brut, ce qui laisse une ample place à l'eau et d'autres matières minérales ;
- **en conflit avec la posture adoptée** : j'ai abordé ce point-ci du statut particulier du terme déchet dans la section III.A.2.c) sur l'écologie industrielle. L'adoption de *résidu*, une catégorie de classe 4, interprétation fonctionnelle sur le plan économique, serait en conflit avec le cadrage conceptuel proposé.

Je rappelle par ailleurs que ma vision m'amène à m'intéresser à la matière, i.e. à *matter*, qu'elle fasse partie d'un *material* ou pas, mais pas de manière exhaustive, ni de manière perpétuelle. J'ai proposé de m'appuyer sur ce qu'on peut désigner comme la « fonctionnalité métabolique », où la sélection est dictée par la délimitation du système d'étude, le métabolisme industriel (Figure III.4), émergeant de ce que j'appelais dans la section qui précède les *matières déclarées d'intérêt* et des *seuils subjectifs d'intensité*. Où le terme « fonctionnel » renvoie à la fois à la conception épistémologique du métabolisme industriel (jusqu'où peut-on considérer que les changements affectent le « fonctionnement » du « système » ?) et à l'objet d'action accepté comme constituant un système. Je rappelle aussi que le métabolisme industriel résulte de, et informe, l'objet d'action, renforçant encore l'importance de cette délimitation en tant qu'activité de recherche initiale. « Fonctionnel » renverrait aussi à une forme de priorisation entre les dynamiques matérielles à considérer en fonction de leur limitation respective au développement, analogue à la loi de Liebig dans le raisonnement de la fertilisation. Cela donnerait en anglais un « *Functional Matter Flow Analysis* », une FMFA se différenciant donc à la fois de la MFA et de la SFA. Cela permet d'admettre que nos classifications de

la matière résultent généralement d'un croisement de critères qui relèvent de la substance, du corps et de la perception, où la différenciation au sein de chaque dimension et la priorisation respective entre elles varient fortement. Il s'agirait donc de partir, ouvertement, d'une classification subjective et mal posée pour la traduire en FMFA.

Ce qui commence à se dessiner est que cette AFMF (en français) serait « pilotée » par les *phénomènes d'intérêt* d'une symbiose industrielle donnée (A-1, section II.D.2.a), où phénomènes d'intérêt ne se limite plus à la partie « environnement » de la sphère de perception de la Figure II.17, mais concerne toute dynamique du métabolisme industriel post-dichotomique (englobant donc l'ancien environnement) estimée, de façon intersubjective respectant l'anthropocentrisme faible, d'intérêt. Cela concerne donc toute dynamique *matérielle* produisant des effets perçus comme souhaitables ou dommageables. Pour un objet d'action de type système territorial de recyclage de résidus organiques, tel que discuté dans le cadre du projet GIROVAR à la Réunion, il s'agit d'effets découlant de l'utilisation intentionnelle des produits organiques issus du recyclage (e.g. substitution d'engrais, mais possiblement aussi pollution du sol), de la fabrication de ces produits (e.g. consommation de matières porteuses d'énergie ; réduction, stabilisation et hygiénisation des volumes de déchets), ou encore de changements de pratiques induits. Cela permet d'identifier les *materials* concernés, dépassant ici clairement les seuls gisements de résidus organiques. Mais je soutiens que cela permet surtout d'identifier la *matter* responsable de ces effets contenus dans, ou plutôt passant par, ces *materials*. Je soutiens aussi que cette *matter* est soit un élément, soit une molécule (ou structure moléculaire). Et qu'il importe de préciser si c'est l'un ou l'autre. Si l'intérêt porte sur l'élément (dans le cas des résidus organiques e.g. N, P, K, oligoélément, élément trace), la considération des formes (molécules, spéciation, colloïde) n'est qu'instrumentale, leur considération devant être justifiée en tant que telle. Si l'intérêt porte sur la molécule (e.g. contaminant trace organique, carbone organique, gaz à effet de serre, nitrate), toute modification de cette structure doit s'accompagner d'une décision portant sur le maintien du statut « fonctionnel ». Le cas de l'azote dans ce métabolisme industriel englobant l'objet d'action « système territorial de recyclage de résidus organiques » indique qu'un seul flux de matière peut correspondre à plusieurs flux fonctionnels, où l'intérêt peut porter sur les deux : l'élément et la structure moléculaire dont celui-ci fait partie.

Ces éléments de cadrage commencent à donner corps à ce qui restait un des relatifs inconnus de notre démarche RORAL : la « flèche retour » vers la recherche analytique/fondamentale en bas dans la Figure II.14, page 66. La considération de la fonctionnalité des flux (dont l'idée de « seuil d'intensité ») constitue une question de recherche que j'ambitionne d'aborder à l'occasion d'un futur projet permettant la mise en œuvre de notre démarche. Une question intéressante, car la réponse fera intervenir autant la perception des acteurs que les dynamiques matérielles liant le métabolisme industriel au réseau métabolique : des dynamiques qui se situent donc en dehors de l'objet de recherche (Figure III.4), obligeant à assumer la nature non-ontologique de ce métabolisme. Il y a sans doute une forme de « dialectique matérielle » à imaginer.

c) *Cadrage thématique : upscaling du système d'action ?*

Dans le domaine de l'innovation, on cherche généralement à promouvoir l'*outscaling* et l'*upscaling* du processus d'adoption du changement après une preuve de concept. La mise en œuvre envisagée de notre démarche RORAL sur de nouveaux terrains, abordée dans la section suivante, correspond à une

forme d'outscaling de nos démarches d'impulsion de changement. Mais les éléments de cadrage discutés ci-dessus invitent aussi à considérer une analogie d'upscaling dans le domaine thématique : nous dérivons l'objet de recherche de l'objet d'action, mais quelle est la portée de cet objet au juste ? Pour les recherches autour de la question de recherche proposée (voir l'introduction de la présente section III.B), quelle est la nature de cet objet de l'action, ce système territorial auquel se réfère l'ensemble de flux matériels étudié ? Je l'ai évoqué jusqu'ici comme « système territorial de recyclage de résidus organiques ». C'est un peu réducteur dans le sens que nous avons déjà vu que, sur le plan des *materials*, la considération ne se limite pas strictement aux résidus organiques. Tout comme une telle circonscription suggère que l'action sur ces matières serait principalement, voire uniquement, le fait d'une motivation d'élimination, d'une logique de gestion de déchets. Or, dans le cas du projet GIROVAR la motivation agronomique était forte elle aussi, et dans l'« ailleurs » futur il se peut que le *pull* agricole soit aussi fort voire plus que le *push* gestion de déchets. Le cadrage indiqué prévaut pour le moment en tant qu'objet territorial de nos recherches en matière de simulation dans notre unité de recherche. Il garde sa pertinence tant qu'elle concerne un « système » d'activités borné d'une part par la production de résidus organiques et d'autre part par l'utilisation en tant que fertilisant de matières obtenues à partir de ces résidus. Pour la première, les activités agricoles et agro-alimentaires correspondant à cette activité de production de résidus ne sont pas interrogées. On ne considère que leur caractéristiques et contraintes d'intérêt pour l'objet d'action, principalement d'ordre logistique. Idem du côté des pratiques agricoles de fertilisation, où ce qui est visé est principalement une « substitution » d'un produit dans une pratique constante par ailleurs. Des deux côtés la logique qui prévaut est la « connexion » de l'objet d'action aux ensembles d'action connexes qui n'impose peu ou pas d'ajustement à ces ensembles. C'est ce que nous dénommons dans O-6 des « filières transversales » au sein d'un territoire établissant des connexions entre filières traversant ces territoires (Figure III.6) : des connexions qui sont bénéfiques au développement de ces dernières mais qui ne les modifient pas.

En même temps que de l'exclure pour le moment, cette idée de « filière transversale » contient les prémisses d'une définition plus large du « système territorial ». On ne pourra souvent pas exclure à l'avance que la symbiose industrielle impliquera un besoin d'adaptation de la part des activités préexistantes concernées. Et dans nos tentatives récentes de montage de projets en collaboration nous l'avons même déjà explicitement envisagé : il s'agissait par exemple de la production de fertilisants organiques par recyclage permettant l'intensification écologique du maraîchage en Afrique de l'Ouest. Est-ce que l'objet d'action peut dans ce cas encore valablement être dénommé comme « système territorial de recyclage » ? Quelle caractérisation serait plus appropriée ?

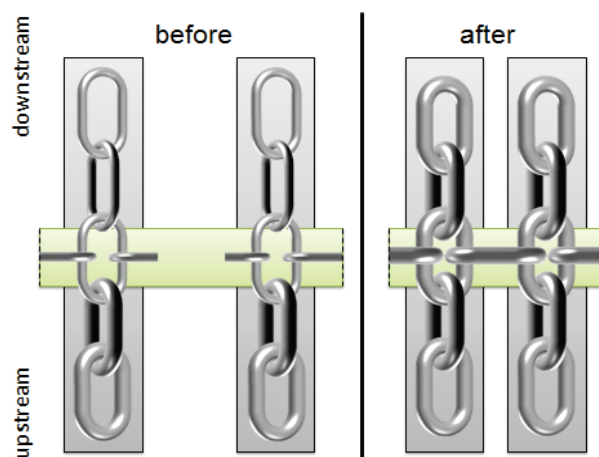


Figure III.6 Des filières (chaînes verticales) peuvent avoir des segments (ici représentés par des maillons) au sein d'un même territoire (bande horizontale). Si les flux locaux entrants/sortants de ces segments freinent le développement de la filière, la symbiose industrielle peut chercher à les transformer en maillon territorial. (O-6)

Si nous poussons ce raisonnement de territorialité transversale aux filières à l'extrême, en convoquant tous les secteurs d'activités impliqués dans les flux de matières organiques – biomasse et nécromasse – d'un territoire pour explorer les potentiels de « symbiose », nous nous retrouvons avec un objet d'action qui correspond à ce qui est connu par ailleurs sous le nom de système alimentaire territorial (SAT ; Rastoin, 2014) ou système agroalimentaire localisé (SYAL ; Requier-Desjardins, 2010) : un « upscaling » qui aurait le mérite de la lisibilité, de l'évocation de nombreux et forts enjeux (OCDE/FAO/FENU, 2017) et d'une cohérence scientifique et sociétale (Doré et al., 2011). Mais dont le champ est si vaste que l'objet de recherche correspondant mobilisera forcément un collectif interdisciplinaire. Il est toutefois intéressant de noter que (1) la part correspondant à l'ensemble composant classiquement notre objet de recherche constitue, d'un point de vue matériel, une part substantielle d'un SAT et (2) dont l'articulation avec le reste du SAT paraît relativement aisée à envisager. Ces deux points sont illustrés par la Figure III.7 où, au sein de l'ensemble de flux de matières – ici principalement au sens *materials*, mais pas seulement – ceux composant classiquement notre objet d'action sont soulignés par un zonage beige. On peut aussi illustrer ces deux points en tentant de lister les ensembles de matières entrants (E), sortants (S) ou circulants en interne (I) d'un SAT selon une classification semblable à celle des matériaux (acceptant donc qu'il s'agit de catégories subjectives et non-exclusives en termes de *matter*). Seul les types de matières en italique et soulignés constitueraient un élargissement du cadrage thématique tel qu'induit par un *upscaling* vers un objet d'action de type SAT :

- matières organiques
 - produits agricoles
 - aliments de consommation humaine (E I S)
 - aliments de bétail (E I)
 - résidus organiques
 - effluents d'animaux (E I S)
 - effluents humains (I S)
 - résidus alimentaires et agro-alimentaires (I S)
 - résidus de culture (I)
 - déchets verts (E)
 - fertilisants organiques (E S I)
- matières minérales (~ inorganiques)
 - engrais P, K (E)
 - carburant (E)
 - eau (E S I)
 - air (E)
 - gaz (S)
- matières de synthèse
 - engrais N (E)
 - matière phytosanitaire (E)
 - matière vétérinaire (E)

Mais je ne pense pas que nous ayons, collectivement au sein de notre unité de recherche, à opérer un choix pour l'un ou l'autre type d'objet d'action. Il me semble que là aussi, cet objet se révélera dans une situation territoriale donnée, résultant de la combinaison du diagnostic que nous chercheurs y établirions et de la répartition des préoccupations des acteurs. Un point de vue qui accroît du coup l'importance de la « promesse plausible » (cf. section II.D.1), une composante de notre démarche

RORAL par ailleurs encore peu formalisée et qui mérite donc que je lui accorde dans mes prochains travaux une attention particulière : c'est un des points que j'aborderai dans la section III.B.2 et qui fait l'objet d'une recherche doctorale qui débutera en 2018. C'est cette « promesse » qui tranchera sur la dénomination du système territorial objet d'action. Un nom qui se situera vraisemblablement toujours quelque part entre « système de recyclage » et « système alimentaire ».

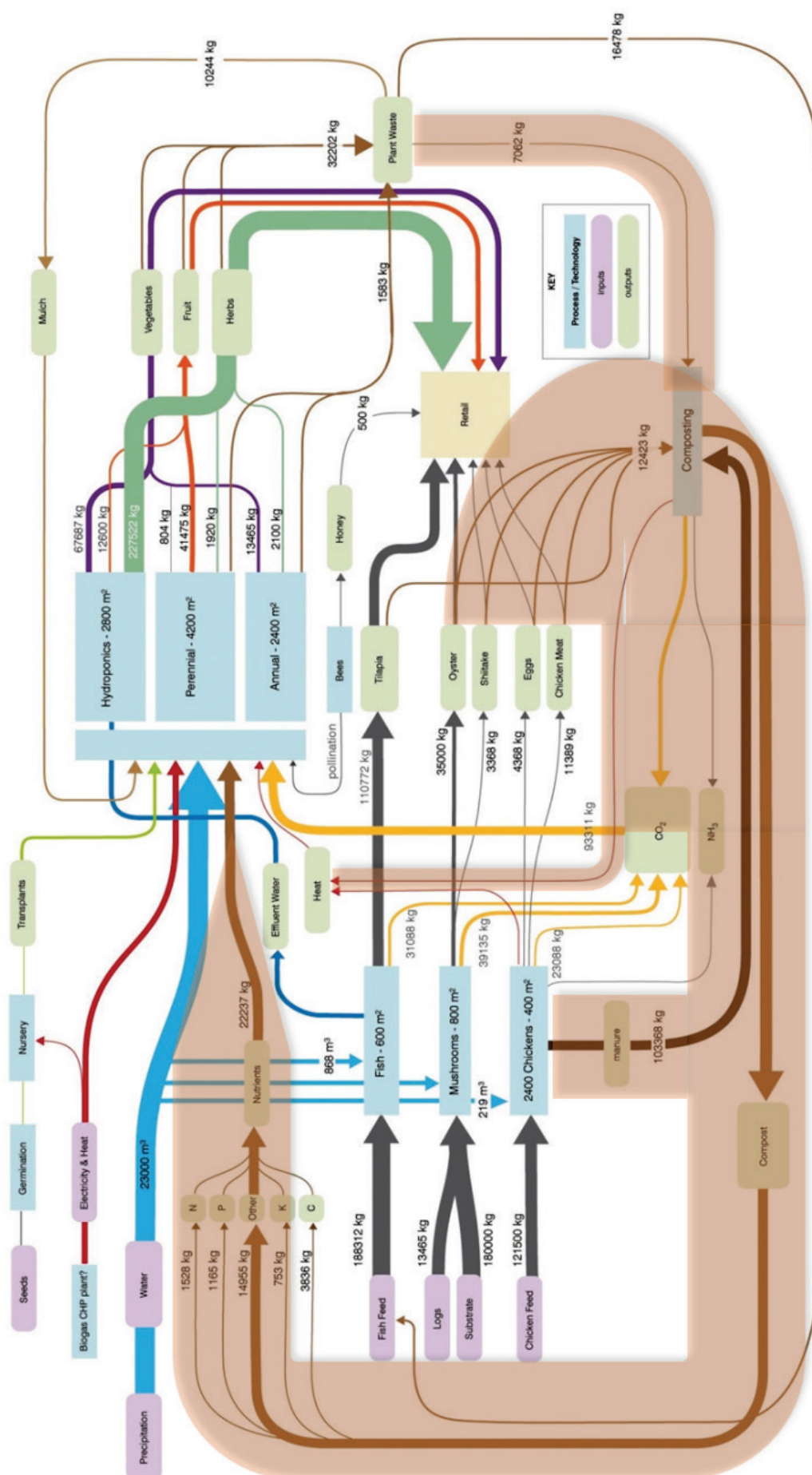


Figure III.7 Un exemple d'inventaire de flux de matières d'un SAT (source: www.except.nl)

d) *Cadrage géographique : outscaling vers où ?*

Tout comme mon usage du terme *upscaling* dans le cadrage thématique qui précède, l'emploi du terme *outscaling* ne fait ici pas référence à son sens premier et classique de réplique, dissémination, etc. Ce sens-là correspond à une critique que je formule à l'encontre de travaux qui ne conçoivent le territoire seulement comme une échelle, un niveau géographique : ces travaux induisent souvent la question « comment aller plus loin ? », « comment transposer ce que nous avons conçu ici à ... ? ». A quoi d'ailleurs ? La région ? La Nation ? Il persiste une certaine conception du territoire comme une échelle de passage obligé. Mais il ne l'est pas plus que l'exploitation (agricole) serait un niveau de passage sur le chemin du territoire. L'exploitation n'est jamais présentée comme telle, et la recherche prétend tout au plus que les exploitations semblables seront « touchées » par un transfert de technologie – une logique dont j'ai déjà argumenté qu'elle n'opère pas dans des situations complexes. Le travail dans et sur un territoire a son intérêt propre, aussi en termes de développement. S'il peut rencontrer un écho ailleurs, nul ne nécessite ni ne justifie de s'occuper par la suite des situations territoriales connexes. Et ce n'est certainement pas la voie appropriée pour promouvoir un changement au travers du réseau métabolique, si tel était l'ambition.

Mais vers où se tourner donc ? Je ne peux là que développer – brièvement – mon avis personnel sur une question dont il convient de remarquer qu'elle me dépasse. Dans le choix d'un lieu, d'une localisation, pour investir des forces collectives, de nombreuses considérations stratégiques et pratiques, de la part des strates hiérarchiques m'englobant et de la part de nos financeurs, entrent en jeu, couplées à une dose d'opportunisme. Ici je me limite à la considération des intérêts en termes scientifique et de développement, deux considérations qui se rejoignent forcément dans une démarche qui s'apparente à la recherche-intervention : c'est seulement là où les enjeux sont les plus forts – en langage moderne : là où le potentiel de contribution aux Objectifs de Développement Durable est le plus marqué – que la mise en œuvre de nos recherches se justifie et est pertinente. Dans A-8 nous avons déjà identifié deux types de situations cibles : les contextes insulaires à forte croissance démographiques et les zones péri-urbaines de métropoles à forte croissance, concentrant tous les deux de nombreuses activités productrices de résidus organiques. Clairement, l'enjeu le plus fort se situe du côté de ces zones péri-urbaines, tandis que nous avons déjà pas mal exploré le sujet en contexte insulaire. Sans en avoir fait une étude exhaustive, il me semble que ces situations péri-urbaines à forts enjeux sont le plus fréquent dans ce que l'on désigne souvent comme les pays émergents. La Figure II.11 l'illustre pour le cas de Bangkok. Les données dont nous disposions à la FAO révélaient des situations semblables au Mexique, au Brésil, en Chine... Et cela ne signifie nullement que l'on ne puisse aussi les identifier dans les pays en développement. Ce qui compte du point de vue considéré ici est qu'une situation retenue satisfasse un ensemble de critères clés : une diversité minimale d'activités productrices de résidus organiques ; une croissance de ces productions et de leur concentration spatiale ; une conscience de la part des acteurs locaux, et notamment de la part des autorités, des problèmes induits ; une activité agricole proche représentant une « demande » considérable de fertilisants.

« Proche » comment ? Comment délimiter donc cette situation territoriale objet d'action pour qu'elle n'inclue pas seulement la production de résidus, mais aussi le « marché » des produits (fertilisant) à imaginer ? Force est de constater que l'objet d'action est moins évident à délimiter ici qu'en contexte insulaire. Je propose de m'appuyer sur une notion de géographie qui m'est apparu comme pertinente : l'aire métropolitaine. Moriconi-Ebrard et al. (2008) distinguent en effet trois entrées pour apprécier la

croissance urbaine : la *ville* (un objet politico-administratif) ; l'*agglomération urbaine* (une morphologie d'occupation du sol) ; l'*aire métropolitaine* (une morphologie de réseaux). Au sujet de cette dernière ils notent qu'il s'agit « *de faire apparaître le fait que le bassin d'influence des grandes villes ne s'arrête pas aux limites morphologiques de l'agglomération mais englobe des villes satellites parfois éloignées du centre, et des zones rurales intermédiaires, étant fortement liées à celui-ci sur le plan fonctionnel. ... Cette approche est fondée sur les mouvements de personnes, de biens matériels et immatériels, ou parfois sur la densité des réseaux. L'aire métropolitaine n'est donc, ni une ville, ni une agglomération, mais un ensemble de flux plus ou moins polarisés.* » (voir aussi Squires, 2002). Voilà un concept qui – en acceptant d'étendre « biens matériels » à « matières » – correspondrait tout à fait à l'objet d'action que je viens de décrire. Une pertinence qui vaut au concept d'aire métropolitaine d'avoir été introduit en écologie industrielle, principalement par des géographes s'intéressant au métabolisme urbain (Brent et al., 2008; Castán Broto et al., 2012; VandeWeghe and Kennedy, 2007). La définition même du terme établit toutefois sans la moindre ambiguïté que le métabolisme correspondant ne se limite pas à l'urbain !

Le recyclage de résidus au sein d'une aire métropolitaine satisfaisant les critères précités me paraît donc un *outscaling* pertinent de notre démarche RORAL. Mais force est de constater qu'il ne sera pas évident de faire respecter par les acteurs les limites matérielles de l'ensemble de flux correspondant à un tel objet d'action : en rajoutant ainsi l'hinterland fonctionnel au (péri-)urbain, l'aire métropolitaine encapsule un SAT à forts enjeux de sécurité alimentaire ! Certains auteurs ont en effet quasiment établi ce lien (Jarosz, 2008; Mount, 2012). Et le SAT encapsule à son tour le « système de recyclage » (Figure III.7), où l'*upscaling* vers le premier apparaît sur le plan matériel comme un pas raisonnable (section III.B.1.c), pour un gain de contribution au développement durable (au moins deux ODD supplémentaires dans le viseur !) sans doute apprécié des bénéficiaires, et de nos commanditaires.

Je rappelle ici, dans ce cadre plus spécifique de l'aire métropolitaine, ce que j'indiquais sur le plan général dans la section précédente : « je ne pense pas que nous ayons, collectivement au sein de notre unité de recherche, à opérer un choix pour l'un ou l'autre type d'objet d'action. Il me semble que cet objet se révélera dans une situation territoriale donnée, résultant de la combinaison du diagnostic que nous, chercheurs, y établirions et de la répartition des préoccupations des acteurs. » Ce qui signifierait que, le cas échéant, (1) nous soyons prêts à assumer les conséquences en termes d'*upscaling* induit par l'*outscaling* de notre démarche ; (2) nous constituerions un collectif de recherche adéquat, dépassant les compétences que représentent notre unité de recherche et ses partenariats actuels⁵⁴ ; (3) tous au sein d'un tel collectif acceptent cet objet-là, englobant le leur.

⁵⁴ L'implication de notre UR dans le « montage » de l'initiative *Transition Agroécologique du Maraîchage en Afrique de l'ouest* (TAMA), non abouti pour l'heure, préfigure une telle constitution de collectif qui, comme ici les UR Hortsys, Qualisud et Innovation, complèteraient nos compétences en particulier dans les dimensions agronomique et alimentaire.

2. Proposition de méthode

Loin de moi l'idée de présenter ici la recette, le guide façon *cookbook* pour aborder le(s) objet(s) (III.B.1) afin de répondre à la question de recherche (III.B) en respectant la posture choisie (III.A). Cela transformerait ce document en testament, tandis que j'espère que même à la fin de ma vie de chercheur je pourrai encore me prévaloir de faire de la « bonne » science, qualifiée par un astronome de renom, entendu à la radio et dont le nom m'a échappé, comme celle qui permet d'avancer vers de nouvelles questions. Tout ce que je souhaite faire ici est de poursuivre le processus de déduction entamé depuis le début de cette section : de dégager quelques pistes à suivre et d'identifier les tout prochains pas à prendre. Il s'agit d'une part d'avancer la construction de l'interdisciplinarité « de proximité » (Jollivet, 2009), un travail d'assemblage entre disciplines « proches », progressivement mise en œuvre depuis quelques années au sein de notre unité et dont les acquis sont à mettre en regard de l'objet de recherche proposé (III.B.1.a). Et d'autre part de résoudre les manquements, identifiés dans les expériences passées, de la démarche participative pour aborder l'objet d'action, qui relève quant à elle de l'interdisciplinarité « élargie ». Une telle structuration, qui s'appuie sur le cadrage conceptuel déduit précédemment, évite clairement la confusion, dénoncée par Jollivet, entre les recherches où l'action est l'objet et celles où elle en est la visée. Mais les recherches que je vise à mettre en œuvre, ou du moins à coordonner, plus personnellement au sein de ces vastes ensembles contribuent aux deux, ou visent plus particulièrement le lien entre eux. Les pistes que je suis sont celles de la contribution à la co-construction de solutions, à la simulation des actions et des flux, et à l'estimation d'indicateurs pour l'évaluation par les acteurs. Des pistes qui ont vocation à se croiser, voire même à fusionner. Mais, comme indiqué, je ne me préoccupe ici seulement que des premiers pas.

a) Co-construction

Le fait que nous ayons défini les grandes lignes de la démarche participative et de notre façon d'y contribuer, et que nous ayons tenté de mettre cela en œuvre dans une situation réelle, ne signifie nullement qu'il n'y a plus de questions qui se posent. Je n'aborderai pas ici les difficultés pratiques rencontrées lors de la mise en œuvre de cette démarche, même si celles-ci méritent bien une réflexion sur la méthode permettant de les résoudre. Ces difficultés-là tiennent en particulier de la conciliation d'une démarche participative adaptative, tributaire d'orientations et de décisions prises au fil de l'eau, avec le cadre formel d'un projet financé pour une durée donnée et dans un cadre budgétaire fixé. Ici je limite ma réflexion à la science. Bien que pour partie induit par des enseignements d'ordre pratique issus de notre expérience à la Réunion, j'identifie trois pistes qui constituent des besoins de recherche qui me concernent, situés à l'extrémité constructiviste de notre continuum RORAL. La première tient de la participation et du rythme du processus participatif, des aspects qui renvoient à une partie de notre méthode somme tout encore peu formalisée : celle de l'initiation de ce processus et de la nature de la promesse plausible.

L'initiation du processus

Comme nous l'indiquons dans A-6, certains groupes cibles ont été faiblement représentés lors des temps forts collectifs du projet GIROVAR. Les maraîchers informels peu habitués à interagir avec des

institutions publiques et les riverains de futures stations de traitement ont peu participé. De plus, l'intérêt des participants décroît naturellement avec le temps et la répétition des ateliers. D'autre part, le rythme des ateliers, ponctué de périodes de production de modèles, de compilation, de consolidation et de combinaisons de données au cours desquelles la participation est mise en suspend rend difficile la mobilisation d'acteurs de terrain dans la durée.

Mieux intégrer les potentiels porteurs de projet et mieux prendre en considération les échelles de temps des différents groupes cibles pour favoriser leur intérêt constitue donc un point d'attention particulier pour une nouvelle mise en œuvre d'une telle démarche participative de co-construction de filières de recyclage. Le raccourcissement des délais entre les ateliers au sein de la durée du projet pourrait être facilité par une étape préalable de préparation scientifique en amont du projet. Du fait de sa longue présence à la Réunion, le CIRAD y disposait de nombreuses connaissances spécifiques du territoire au démarrage du projet. La réalisation de projets similaires sur des territoires moins bien connus demandera une phase d'inventaire plus longue en début de projet et qui décalera d'autant le démarrage de la phase de co-construction. L'expérience acquise et les méthodes et outils développés devraient ensuite permettre de mieux préparer cette phase-là, et donc aussi de réduire sa durée.

Mais il serait réducteur de voir le problème comme purement organisationnel, ce qui amènerait à une solution pratique d'un projet en deux étapes : une étape préalable de préparation scientifique en amont d'une phase de co-construction. Le pragmatisme et l'anthropocentrisme faible mettent eux aussi l'accent sur l'étape initiale de la démarche : l'identification intersubjective des problèmes et conflits, fournissant le cadre de l'analyse. Il nous faut nous doter d'une approche permettant la circonscription de l'objet de l'action, cet ensemble cohérent d'activités *fonctionnelles* considéré tel un *système* territorial évoqué précédemment (III.B.1.a). C'est pour cela que j'ai milité pour son inclusion en tant que composante à part entière au sein de projets lors de récentes réponses à appel d'offre. Mais en réalité cette recherche-là débute avant, lors de cette phase même de « montage », qui n'a pas lieu d'être si elle ne s'appuie pas sur cette identification intersubjective des problèmes et conflits. Ce cadrage est décisif car c'est lui qui déterminerait (1) si l'ambition va se limiter au « système de recyclage » ou si au contraire elle va porter sur un « système alimentaire » ; (2) quel ensemble de compétences scientifiques convoquer ; et (3) quels groupes d'acteurs à impliquer par la suite. Idéalement, cette circonscription de l'objet de l'action, impulsée par nous, serait portée par un partenaire scientifique local doté d'un recul thématique suffisant. Elle impliquerait une sélection très restreinte d'experts locaux, professionnels et politiques, ayant un recul suffisant pour porter une analyse sur la situation territoriale et qui, ensemble, sont susceptibles de rendre crédible la pertinence de la circonscription résultante. S'appuyant sur des connaissances et des informations aisément mobilisables, une telle circonscription constituerait autant une proposition de nature thématique que géographique.

Une autre partie de cette même piste qu'il serait urgent de dégager concerne la nature de la promesse plausible : une fois arrêté l'objet d'action, quelle est cette « promesse » à formuler auprès des représentants des groupes d'acteurs invités à co-construire les solutions ? Dans le cas du projet GIROVAR nous avons opté pour une orientation générale peu explicite et je cherche désormais à tester l'hypothèse que la proposition de promesse(s) « symbiotique(s) » plus explicites et détaillées, mais limitées aux considérations techniques, permettrait à la fois une meilleure mobilisation et un déroulement plus efficace du processus de co-construction. Car dans des situations complexes et où les gains économiques sont peu évidents ou immédiats (contrairement souvent au gain

environnemental), la mobilisation des acteurs à impliquer dans la symbiose industrielle requiert préalablement une démonstration du potentiel d'action et de ses bénéfices. Comme suggéré par Douthwaite et al. (2002), notre démarche s'appuie sur la formalisation par la recherche d'une promesse plausible basée sur ce potentiel d'action et ses bénéfices. Cependant, le degré de formalisation d'une telle promesse n'est pas précisée par ces auteurs. L'expérience du projet GIROVAR enseigne qu'il s'agit là d'un compromis à raisonner. D'une part ce degré doit être suffisamment élevé pour permettre un processus de co-construction efficace respectant les contraintes et attentes temporelles des acteurs, un élément clé pour l'adhésion des acteurs au processus (R-3, A-6). D'autre part ce degré ne doit pas atteindre le niveau d'une symbiose industrielle descendante, planifiée, qui mettrait en péril la légitimité des chercheurs vis-à-vis des autres acteurs et serait assimilé à un simple transfert de technologie (A-8). J'identifie cette question de l'initiation et de la formalisation d'une promesse plausible comme un verrou scientifique à résoudre. Puisque la nécessité d'agir et le bénéfice potentiel de la mise en œuvre de symbiose industrielle relèvent bien d'aspects techniques et matériels, déclencher des initiatives de symbiose industrielle relève de recherches mobilisant les sciences expérimentales et sciences de l'ingénieur. Or, l'émergence et la promotion de symbiose industrielle n'ont pour l'instant été étudiées que par les sciences sociales (Ashton, 2008; Baas et Boons, 2004; Chertow et Ehrenfeld, 2012). Cela m'a amené à proposer un sujet de doctorat pour répondre à la question suivante : Comment développer une « promesse agro-environnementale et technique plausible » des potentialités de symbiose industrielle territoriale, en mobilisant l'agronomie, les sciences de l'environnement et le génie des procédés ? Répondre à cette question nécessite le recours à la modélisation systémique. Déjà mobilisée dans le projet GIROVAR pour l'évaluation des scénarios, une fois que ceux-ci aient été co-construits avec les acteurs, cette modélisation, s'appuyant sur une analyse fine du système territorial et de son métabolisme, a aussi vocation à devenir un véritable outil pour initier ex-ante des projets de symbiose pour ensuite les partager et développer avec les acteurs. Ce lien avec la science des systèmes complexes, préconisé par Batten (2009), constitue actuellement un front de science dans la communauté de l'écologie industrielle (Dijkema et al., 2015). C'est donc sur le rôle et la caractérisation de cette modélisation dans l'initiation de projets de symbiose industrielle que se focaliserait le travail proposé⁵⁵. Il répondrait à la question générale à travers deux objectifs : (1) établir une gamme de simulations de réalisations des potentialités territoriales identifiées, validées auprès des acteurs, comme constituant une promesse plausible appropriée ; et (2) déduire de ces recherches, des règles et une méthode pour générer de telles promesses techniques.

Au-delà de la co-construction de scénarios, favoriser l'apprentissage

Les scénarios de symbiose industrielle co-construits constituent l'objectif central de nos démarches, mais leur réalisation « à la lettre » n'en est pas la finalité. Les territoires où nous choisiront de travailler sont soumis à des dynamiques marquées. Il se peut donc que les conditions sous lesquelles les scénarios ont été élaborés ne soient plus tout à fait les mêmes à l'issue de la démarche participative. Et même si elles ne changeaient pas, il se peut qu'à cette issue-là personne ne soit candidat pour porter la réalisation en tant que telle de la solution identifiée, comme ce fut le cas à la Réunion. Cela n'empêche ces scénarios d'être des outils précieux aux mains des acteurs pour les aider à convaincre et à inciter au développement d'initiatives en ce sens, mais qui dans ces cas-là sont des réalisations

⁵⁵ Actuellement soumis à l'ANRT en collaboration avec Véolia pour un financement de thèse CIFRE (recrutement prévu début 2018). Ce travail s'appuiera sur un projet récemment lauréat de l'Ademe, PROTERR (lancement janvier 2018), visant une forme de symbiose industrielle sur la Plaine de Versailles.

pas-à-pas dont le résultat cumulé pourra fort bien dévier de la direction indiquée par tel ou tel scénario. Surtout, bien qu'un outil précieux, ce n'est qu'un outil parmi d'autres. Et l'émergence du plus grand nombre possible de ces « autres » outils peut et doit être favorisé au cours du processus participatif. Vous me direz que cela relève de l'attribution du facilitateur de ce processus, probablement un chercheur en sciences humaines et sociales. Mais en tant que participant « possesseur » de la connaissance scientifique thématique, moi ou tout autre « chercheur RORAL » a vocation à y contribuer activement.

C'est ce qu'illustre le cas du projet GIROVAR, car à l'issue de ce projet nous avons cherché à mettre en évidence la nature des relations causales entre le processus de concertation et les changements observés (AS-2, R-1). De cette analyse se dégagent des apprentissages aux niveaux individuel et collectif et un mythe rationnel qui induit une forme de coordination entre acteurs. Au niveau individuel, on note l'acquisition de connaissances formelles et informelles sur l'objet de la concertation - les matières organiques et leur recyclage -, les autres parties prenantes et les interactions entre elles (Daré et al., 2010). Les apprentissages réalisés ne sont pas des découvertes complètes mais une réduction des incertitudes liées à cet objet. Les apprenants sont pour l'essentiel ceux qui (i) participent aux ateliers de concertation, (ii) possèdent déjà une certaine connaissance du sujet et (iii) ont l'opportunité de mettre en pratique ces connaissances dans le cadre de leurs activités professionnelles en parallèle des ateliers.

Une autre forme d'apprentissage observé au niveau collectif s'apparente selon les collectifs concernés à un apprentissage organisationnel ou social. Au niveau de trois organisations, le processus de concertation influence l'organisation du travail, le recrutement de nouveaux agents et les orientations stratégiques. Au niveau intersectoriel, il ressort des enquêtes que nous avons conduit un renforcement d'une communauté de pratique (Wenger, 1999) existante de techniciens, d'ingénieurs et de fonctionnaires concernés de près ou de loin par l'objet de la concertation.

Hatchuel et Molet (1986) dans le domaine des sciences de gestion et Holm (1999) dans le domaine de la gestion des ressources naturelles ont introduit le concept de mythe rationnel qui nous paraît pertinent pour rendre compte de ce qu'entraînent ces mécanismes, et qui constitue un objectif de la démarche au même titre que les scénarios – bien que pas nécessairement explicitement affiché comme tel. Un mythe rationnel est un *discours* combinant un problème à résoudre – ici lutter contre le gaspillage des nutriments – et une solution technique susceptible de résoudre ce problème – ici le recyclage sous la forme de fertilisants normés. Le processus de concertation permet de traduire les intérêts des acteurs, les contraintes biophysiques, les opportunités technologiques et les pratiques existantes en une proposition sociotechnique à la fois institutionnellement légitime, techniquement crédible et jugée pertinente par des acteurs locaux (Clark et al., 2016). L'argument résultant est utilisé par les participants aux ateliers dans leur contexte professionnel pour enrôler d'autres collègues, supérieurs hiérarchiques (Callon, 1986). Il influence de ce fait certaines décisions et certains micro-arrangements au-delà du collectif réduit des participants aux ateliers. La croyance dans ce mythe permet également d'éclairer l'avenir. L'anticipation de cet avenir compose une feuille de route informelle qui oriente les décisions des différents acteurs vers une direction commune sans qu'ait été élaboré explicitement un plan stratégique.

Une grande diversité d'initiatives peut être entreprise pour favoriser l'émergence de – et l'adhésion à – un tel mythe. Parmi elles plusieurs concernent sans doute le chercheur-acteur que nous sommes.

Cela peut aller de l'intervention opportuniste au sein de micro-arrangements jusqu'à des cours magistraux et des expérimentations agronomiques. Je n'ai pas de proposition de méthode à mettre à l'épreuve, mais j'identifie la question des activités à mettre en œuvre en parallèle du processus de co-construction comme un élément clé de la conception, comptant sur les partenaires locaux et facilitateur pour établir ensemble un diagnostic des besoins. Il s'agit de mieux anticiper ces besoins que ce qui a été le cas à la Réunion, où ce n'est qu'à l'issue du projet GIROVAR que le besoin d'essais de fertilisation organique a été entendu et que notre collectif s'est investi dans la formation professionnelle à destination des collectivités, du conseil et de l'enseignement agricole. Ce sont là de premiers pas sur une piste qui nous amènera plus loin, car ces pas entraîneront inéluctablement la question plus vaste de l'accompagnement. Où il s'agira (i) de préciser la nature de certains mécanismes par lesquels un projet de recherche en concertation peut accompagner l'évolution de son objet de recherche, et (ii) de savoir si – et si oui comment – il convient de maintenir une présence sur une durée permettant à ces recherches d'évoluer vers de la recherche-intervention, alternant contextualisation et formalisation du changement (David, 2000).

Assumer, malgré lui, la parole politique du chercheur

Les échanges au sein des arènes de co-construction ne se situent jamais au niveau de la matérialité. Les objets « manipulés » sont des abstractions : on n'y réfléchit pas sur le devenir d'un gisement de PRO particulier existant à l'instant, ni à la satisfaction des besoins d'une situation matérielle particulière, tel l'état du sol, à un instant, d'une parcelle donnée. Aux chercheurs RORAL impliqués dans la co-construction de gérer, très explicitement, leur propre « schizophrénie » (cf. l'introduction de la présente section). Aux chercheurs la responsabilité, mais aussi la maîtrise, de l'abstraction extensive, du lien avec la réalité matérielle. Ce qui inclut la correspondance à établir entre les conséquences matérielles et les phénomènes d'intérêt (II.D.2.a), un domaine de recherche majeure guidé par les trois critères de validation de Bockstaller et Girardin (2003) sur lequel je reviendrai dans la section III.B.2.c).

Mais notre *boundary work* va bien plus loin, car nous ne sommes pas juste fournisseurs d'informations à un processus auquel nous serions étrangers : le chercheur-acteur en est partie prenante, pour échanger avec les autres acteurs autour des intérêts et défauts de la promesse plausible, pour apprendre d'eux, tout en mettant tout en œuvre pour que les autres apprennent aussi de lui. Nous prétendons que notre participation au sein de l'arène technique est de poids égal à celui des autres, mais dans le cas de GIROVAR nous n'avons pas cherché à vérifier cela, tandis que nous étions à la fois moteur et pilote, assurant en plus le gros du travail de traduction à destination des autres arènes. Comme nous l'indiquons dans AS-1, la ligne séparant la production de la connaissance et la prise de décision politique s'est avérée assez fine, soulignant la complexité et l'ambiguïté des relations entre les scientifiques et les sociétés, pas entre la science et la société au sens large. Par tout ce que nous mettons en œuvre, nous cherchons à influencer sur ce que Boons et Howard-Grenville (2009) appellent le « *social embeddedness* » de l'écologie industrielle : la manière dont les flux de matière et d'énergie sont façonnés par le contexte social au sein duquel ils ont lieu. Cela dit, sans l'avouer, que nous sommes nécessairement porteurs d'une parole politique⁵⁶. Mais nous ne l'assumons pas consciemment, tandis

⁵⁶ le discours politique peut être approché tout simplement comme une parole publique sur la chose publique. C'est un discours qui témoigne de la préoccupation de l'homme par rapport à la gestion de la cité. Le discours politique comme un « discours d'influence produit dans un monde social », et dont le but est « d'agir sur l'autre pour le faire agir, le faire penser, le faire croire ».

que l'ambition de la construction d'un collectif, telle qu'autour du mythe rationnel dans notre cas, est éminemment politique. Et je soutiens qu'il s'agit là bien d'une ambition, d'une intention, et non pas d'une conséquence que nous constatons naïvement à l'issue du processus, même si dans le cas de GIROVAR on ait pu le présenter comme tel. Assumer d'être porteur d'une parole politique est peut-être le plus gros effort qu'aura à réaliser le chercheur RORAL se pensant positiviste, mais j'ai espoir que la posture matérialiste, en obligeant de rendre le passage à l'interprétation fonctionnelle très explicite, lui sera utile à cette fin.

Par « assumer » je veux dire que ce chercheur, moi-même inclus, devra user de façon raisonnée des « secrets » de cette parole comme les clichés, lieux communs, symboles et stratégies de captation interpellant l'interlocuteur en complice. Et que pour cela il doit se familiariser avec la culture, le monde d'interprétation des acteurs. Il s'agit non pas seulement d'accepter leurs cadres, mais aussi de les utiliser intelligemment, c'est-à-dire questionner le fonctionnalisme (sous-tendant les concepts employés comme e.g. services écosystémiques, mais aussi des termes tels dégradation, perturbation, restauration, etc.), sensibiliser à la perspective co-évolutionniste (A-4), à la condition de « terrestre », cf. Latour (2015), donner une voix à la chose désanimée, revisiter les « communs » en tant que milieu partagé dont chacun est comptable (cf. la définition que Descola en donne dans sa leçon inaugurale au Collège de France⁵⁷). C'est bien à cela qu'incite l'anthropocentrisme faible de Norton (section II.D.2.a). Une intention hautement politique, car la politique est une affaire de rapports de mondes, d'ajuster dans certains espaces des mondes qui ne coexistaient pas auparavant, faire coexister des projets différents sans que cela n'aboutisse à des conflits (Rancière, 1995, cité par Descola⁵⁸).

Il me semble que la finalité derrière l'ambition de construction de collectif soit l'action sur le système territorial qui entraîne des changements dans le métabolisme industriel dont il fait partie (Figure III.4) qui soient bénéfiques pour l'ensemble des acteurs. Ce métabolisme industriel ne sert donc pas seulement comme base de l'interprétation, comme réalité dévoilée seulement aux chercheurs, « caché » derrière les indicateurs produits par ces derniers. Une telle finalité les incite justement à en promouvoir le partage (ce qui renvoie à nouveau à la section III.B.2.c). Et l'emploi de certains concepts peut se révéler instrumental. Pour mettre en avant un seul exemple, il me semble que le concept de bien commun peut, en fonction du contexte, faire partie de ceux-là. Pour citer la leçon inaugurale de Descola :

*La tragédie des biens communs (Hardin, 1968) est un mythe : l'accès aux ressources est toujours réglé par des principes localement contraignant qui visent à protéger la ressource au profit de tous. Le problème de communs est donc la définition des droits d'usage des propriétés communes. Il est sans doute plus important encore **d'étendre le périmètre des composantes intangibles de ce milieu commun collectivement appropriés bien au-delà des objets habituels**. Ceci implique évidemment de bouleverser la définition habituelle d'appropriation comme l'acte par lequel un individu ou un collectif devient le titulaire d'un droit d'usus et d'abus sur une composante du monde et d'envisager un dispositif dans*

(source : <http://www.analyse-du-discours.com/discours-politique>)

⁵⁷ « Leçons inaugurales du Collège de France », n° 159, juin 2013 : <http://www.college-de-france.fr/site/philippe-descola/inaugural-lecture-2001-03-29.htm>. Voir aussi les vidéos du colloque « Comment penser l'Anthropocène ? » au Collège de France de novembre 2015 : <http://www.fondationecolo.org/l-anthropocene/video>

⁵⁸Jacques Rancière, 1995. La Méésentante, Editions Galilée. Cité par Philippe Descola dans l'émission L'Heure Bleue, France Inter, le 8 mai 2017

lequel ce serait plutôt des « écosystèmes » qui seraient porteurs de droit dont les humains ne seraient que des usufruitiers ou, dans certaines conditions, des garants.

Latour (2015) tend dans ce même sens (soulignage de ma part) :

*La tragédie (des communs) vient de la croyance récente que l'on ne peut calculer l'intérêt de l'individu - étatique, animal ou humain peu importe - que d'une seule façon, en le posant sur un territoire qui n'appartient qu'à lui et sur lequel il régnerait souverainement ; puis en renvoyant « à l'extérieur » ce qui ne doit pas être pris en compte. C'est la nouveauté autant que l'artificialité de ce type de calcul que souligne bien le terme technique d'externalisation [...] [la solution est] **d'apprendre à représenter différemment le territoire auquel on appartient.** [...] Il s'agit, au fond, d'internaliser les empiètements innombrables de ceux dont nous découvrons peu à peu combien nous en dépendons pour subsister.*

... En termes de géopolitique, la question revient donc à visualiser sur le même sol plusieurs autorités superposées [une phrase que je me permets de transposer : en termes de recherche écologique la question revient à visualiser sur le même territoire les entités biophysiques correspondantes ainsi que leurs relations pour dessiner le réseau métabolique] [...] Pour nous donner une vision enfin réaliste de nos appartenances, il nous manque une géographie des territoires discontinus et superposés. [...] Chacune de ces boucles [de rétroaction aux limites] enregistre les réactions inattendues de quelque agent extérieur qui vient compliquer l'action humaine. A cause de cette réactivité, ce que signifie un « territoire » s'est trouvé totalement bouleversé [...] faites en sorte qu'une boucle soit traçable et publiquement visible, sans quoi nous serons aveugles et démunis, sans aucun sol sur lequel nous établir.

Vaste programme où la parole ne peut sans doute pas tout. Justement : ces éléments indiquent aussi que la modélisation informatique, possible « traceur de boucles », est un artifice qui a vocation de lui venir en aide.

b) Modélisation et simulation dynamique de flux

Voilà un autre programme vertigineux. L'adoption de la posture et de l'objet proposés signifient que beaucoup reste à faire pour qu'un modèle multi-agent dynamique comme UPUTUC devienne ce simulateur versatile totalement en phase avec ces orientations : étendre son champ à ce sous-ensemble de l'actualité matérielle qu'est le métabolisme industriel ; assurer le lien (donc représenter la rétro-action) avec les métabolismes connexes (à la place d'un travail sur le changement d'échelle) ; permettre au flux matériels d'impacter l'action humaine (autre forme de rétro-action) ; inclure d'autres « forces d'agir » comme acteurs ; permettre de focaliser la simulation tantôt sur les flux, tantôt sur l'action ; etc.

Au-delà de ces (grandes) questions techniques, il me faut répondre à une question fondamentale : Est-ce que ma posture épistémologique est compatible – et si oui, comment – avec une activité de modélisation ? Ou comme le formulent Hervé et Laloë (2009) : Pour aborder des objets complexes, peut-on en rester à une approche expérimentale ? Non, car sa capacité d'inférence est bien trop faible

pour éclairer l'intérieur de la boîte noire. Legay et Deffontaines (1992) proposaient déjà de donner à l'enquête-observation le même statut scientifique qu'à l'expérience, un statut de méthode. Et Legay (1997) considère « l'ère des modèles » comme une quatrième étape, actuelle, dans l'évolution du statut de l'expérience. « L'ère des modèles » serait celle de la « complexité choisie » : on observe des situations « réelles » dont on décide de rendre compte selon des systèmes complexes, et dont le caractère instrumental justifierait l'acceptation du fonctionnalisme qui le sous-tend. Tant que je reste donc dans une logique de rendre compte d'une situation réelle, et non pas d'une abstraction extensive de cette situation, j'estime rester fidèle à une démarche matérialiste. Les objets de mon modèle doivent donc représenter des objets matériels (et non des matériaux !), forcément situés. Et ces systèmes complexes sont les systèmes qui donnent à ces objets leur fonctionnalité (interprétée). Je me situe là donc bien dans ma Classe 3, le dernier niveau matérialiste (section III.A.2.a).

Soyons plus concrets : la modélisation s'appuie sur des connaissances, mais aussi des décisions préalables, qui ne sont pas de son ressort. Dans une situation donnée, le cadrage géographique et thématique préalable détermine l'ensemble de (flux) matériels à représenter *comme si* ce fut un système. A partir de ces éléments, c'est à la modélisation de simuler le devenir de ces matières, avec une précision variable, mais toujours justifiée – en fonction de la capacité de représentation et du besoin d'information des forces d'agir que sont les acteurs. Et cela jusqu'à ce qu'elles atteignent, si cela arrive, en un lieu donné, la limite prédéterminée de ce métabolisme industriel. Et c'est l'ensemble de ces parcours, passant par une série d'objets matériels, qui déterminent cette collection d'objets. Dans le métabolisme d'un système de recyclage on peut ainsi trouver des instances de « choses » matérielles aussi variées que parcelle agricole, vache, salade, sous-sol de parcelle, nappe, camion, compost, lisier, bassin de station de traitement, air. Du point de vue matérialiste, tous ces objets ne sont que des compartiments, des matrices par lesquels passe (donc toujours dynamique, cf. le cadrage conceptuel, section III.B.1.a) la matière à « tracer » – carbone, azote, phosphore, potassium, soufre, ETM, oligo-éléments et des formes moléculaires particulières – dont je note au passage que cela signifierait déjà une petite révolution pour un modèle comme UPUTUC⁵⁹. Le pragmatisme m'autorise l'abstraction intensive que représente le regroupement des objets comme s'ils furent des instances d'une même classe – jusqu'à ce que la non-appartenance à la classe ne devienne manifeste. Voilà une diversité de classes-compartiments bien supérieure aux variantes des classiques air-eau-sol des modèles « multi-média » s'exprimant sur le devenir dans « l'environnement ». Une diversité qui en fonction du critère de précision peut être accrue ou diminuée par l'ajout de, l'association aux, ou la substitution par les, objets « collection » en relation hiérarchique, du fait de la représentation systémique acceptée car instrumentale, avec les classes-compartiments : le « bassin de » pointait déjà vers la collection « station » ; « compost » peut se voir substitué par « andain », auquel on peut associer « station » ; « parcelle » et « vache » peuvent se trouver dans une collection « exploitation ». Mais il s'agit toujours d'objets matériels, de ce que l'on pourrait désigner comme « méta-compartiments » de flux. Toute réalité autre que matérielle, donc tout ce qui n'est pas actualité (ou plutôt : qui ne serait pas actualité si le modèle était réalité) – les réalités réglementaire, administrative, économique, sociale – est dissociée de ce niveau matériel. Si, sur le plan du formalisme informatique,

⁵⁹ Il me faut ici mentionner un des précurseur d'UPUTUC, le modèle COMET (Paillat et Guerrin, 2011), un peu plus avancé sur ce point. Pour les seules effluents d'élevage, COMET « gère » en effet en parallèle, mais encore de manière indépendante, à partir du rejet par les animaux, à la fois la quantité d'effluent (le contenant *material*) et l'azote (l'un des *matter* d'intérêt), considérant les flux « biophysiques » (émissions gazeuses) et les changements de forme de l'azote au sein même des compartiments (fosses de stockage) du système territorial d'action.

ces compartiments peuvent être traités comme des « agents », ils n'effectuent des actions que sous l'impulsion de forces d'agir – que ce soient l'eau, les micro-organismes ou l'homme – et c'est au sein de la représentation de cette force humaine s'exerçant sur les objets que je souhaite restreindre celle des autres réalités.

Une telle proposition revient donc à simuler les flux de *materials* comme objet d'action humaine tout comme balise/contenant d'une sélection de *matter*, simulée quant à elle comme objet « d'action » d'agents humains et non-humains. Pour la *matter* il n'y a ainsi plus question de flux entre « stocks », mais elle passe d'une « main » à une autre, où son séjour auprès de chaque agent représente un jeu de conditions particulières, résultant de la combinaison de son contenant *material*, si présent, placé dans l'environnement d'un agent. Si cette combinaison induit un changement de la *matter*, ce qui n'est pas obligé, le rôle de l'environnement peut être passif – il s'agirait d'un processus de rééquilibrage physicochimique – ou actif, faisant intervenir des agents biologiques ou physiques. Prenons le cas d'une *matter* d'intérêt telle l'azote ou le phosphore dans un *material* lisier de porc. Dans les conditions d'un agent « camion-citerne » (taux de remplissage, température, ...) à temps de séjour court, cette action peut être principalement passive – autrement dit l'effet d'une force d'agir physico-chimique (e.g. volatilisation d'ammoniac). Tandis que l'environnement d'un agent « sol » ou « andain » (de compostage), à temps de séjour long ou moyen, peut être riche d'acteurs biologiques (comme les micro- et macro-organismes) et physiques (tels la pluie ou le rayonnement), s'ajoutant à l'action passive de la matrice organo-minérale. L'homme peut s'ajouter – par e.g. le labour ou le retournement – aux forces d'agir biologiques. Où l'action sur l'ensemble des *matters* constituant le *material* peut modifier ce dernier, catégorie de classe 2 ou 3, au point de le faire disparaître – ce à quoi même sa simple dispersion spatiale peut suffire. Je répète que la représentation (niveau de détail/généralisation, formalisme, etc.) de la dynamique d'une *matter* donnée auprès d'un agent donné dépendra de l'objectif (est-il utile de chercher à représenter explicitement l'action de ses forces d'agir ?) et de la connaissance disponible.

Une modélisation de flux à deux niveaux

J'estime que la posture proposée est un point de départ approprié pour dépasser ce que Jollivet (2009) appelle « l'interdisciplinarité de proximité »⁶⁰ à l'origine de ce « double désajustement » de projections contraires qui ne se rencontrent pas : un désajustement entre des recherches qui tiennent leurs distances par rapport aux aspects matériels de phénomènes et d'autres qui font de même avec les pratiques, et qui, selon lui, est la conséquence de l'approche sur la base de la dichotomie nature/société. Ce que je vise est bien une démarche d'interdisciplinarité « élargie » fondée sur la confrontation des deux projections en cause. C'est ce à quoi appelle Jollivet : il s'agit de construire une problématique *ad hoc* centrée sur la combinaison des sciences de la nature et des sciences de l'homme et de la société et mettant en œuvre la confrontation entre disciplines qui fonde l'interdisciplinarité en tant que telle. Et si ma posture peut en être le point de départ, la modélisation en est un instrument essentiel. Jollivet interpelle d'ailleurs la modélisation à ce sujet :

⁶⁰ Jollivet (2009) explique par cette tendance à l'interdisciplinarité de proximité que les chercheurs en sciences sociales se soient saisi tardivement des questions d'environnement et qu'ils prennent « soin de tenir leurs distances par rapport aux aspects matériels de phénomènes (qui ne sont en effet scientifiquement pas de leur ressort), à les ignorer dans leurs analyses, quand ce n'est pas à en dénier l'intérêt, si ce n'est même la réalité ».

La modélisation n'a de sens dans une démarche d'interdisciplinarité élargie que si elle s'avère un outil particulièrement adapté à la formalisation des phénomènes d'interface et du caractère hybride des objets qu'ils produisent. Peut-elle être cet outil sans être d'abord un outil de dialogue entre les points de vue associés ? A l'évidence, non.

Cette question se veut une interpellation, car il me semble bien que ce soit le contraire qui se passe : la force simplificatrice et les exigences formelles de l'outil l'emportent souvent sur les questions de fond que son usage pose.

Il me semble que cette confrontation coïncide avec celle entre l'actualité matérielle (mes catégories de classes 1, 2 et 3) et la sphère conceptuelle et abstraite dans laquelle l'homme conçoit et gère son action (sur l'actualité matérielle, à travers les catégories de classe 4). Pour éviter le piège indiqué par Jollivet, la stratégie suivante me paraît, par rapport à la problématique à laquelle s'intéresse mon unité, particulièrement intéressante à explorer : une modélisation à deux niveaux, conformément au couple système territorial – système métabolique, obligeant à expliciter les liens entre les deux : le niveau de la réalité perçue qui représente l'action de l'homme et tout ce qui la régit, et le niveau de l'actualité matérielle où seraient représentés – idéalement de manière explicite car favorisant l'émergence (ultérieure...) de cette arène politique où ces forces s'affrontent, où les territoires se superposent, appelée de ses vœux par Latour (2015) – les effets de toutes les forces d'agir, basé autant que possible sur des connaissances empiriques. Un lien qui, comme décrit ci-dessus, est assuré par les objets *material*, objets de l'action de l'homme d'une part et contenant de matière de l'autre, intégrant ainsi le système territorial au sein du système métabolique.

Avec ses dynamiques propres, le niveau du système métabolique servirait de mémoire matérielle dont l'évolution serait à même d'altérer la réalité perçue, par le biais de liens à expliciter dans l'autre sens. Comme souhaité, la dichotomie serait ainsi dissoute. Il n'y a pas non plus besoin de matérialiser un « environnement » absolu, tandis que les trois types d'environnement comme relation objet – sujet (A-1) sont bien couverts par ce second ensemble de liens. Il s'agit en quelque sorte de la généralisation des deux niveaux de la Figure II.17 (page 75), étendant le niveau « perception » à « perception et action » et reconnaissant que tout changement dans la « réalité biophysique » a lieu au sein d'objets-compartiments (ce que la mention « object and media changes » dans la figure indiquait déjà, où « changes » renvoie à la *matter* en leur sein qui les produit). Ce qui produit par ailleurs l'effet désirable consistant à accepter tous ces objets comme objets de possible action, inclusif ceux habituellement considérés comme « hors d'atteinte » puisque dans l'environnement.

Une telle simulation conjointe à deux niveaux serait bien mieux posée que le « couplage » que nous envisageons jusqu'alors entre un modèle du « système de gestion » par l'homme et des modèles biophysiques. Car, comme dans un modèle comme UPUTUC, un tel système de gestion focalise sur les objets *material*, considérant sa composition en *matter* comme figée, sauf quand l'action humaine vise explicitement son évolution (e.g. lors du compostage). Tandis que ces objets *material* ne sont pas représentés dans les modèles dits biophysiques ! Ce n'est dans une telle configuration que lors qu'elle quitte le système de gestion que l'on ferait « réapparaître » la *matter*, par une correspondance maladroite, et qu'on lui « rendrait » sa dynamique. En revanche, une modélisation à deux niveaux remplacerait une telle vision séquentielle par une approche parallèle : le niveau du système d'action, représentant la gestion humaine des objets *material*, à l'aide d'une modélisation événementielle de la dynamique, « informe » la matière d'intérêt (*functional matter*) des conditions physiques dans

lesquelles elle se trouve, et des changements dans ces conditions. A l'aide de cela, le niveau métabolique représenterait, suivant une modélisation continue de la dynamique, l'évolution de l'état et de la forme du *matter* et celle de ses conditions physiques. Cela comprend la possibilité de quitter la matrice/compartiment du *material* objet de gestion humaine. Ces évolutions peuvent ensuite éventuellement informer à leur tour les agents informatique représentant les acteurs. Elles peuvent aussi servir à informer des indicateurs à destination desdits acteurs (section III.B.2.c). Ce serait l'aboutissement d'une ambition « d'intégration » affichée par mon unité et activement poursuivi sur le plan informatique. Et à l'instar d'UPUTUC et de mon travail sur l'estimation de la dynamique des molécules organiques présentes sous forme de trace (A-5), au cours et après la gestion d'un résidu organique, de nombreuses « briques » existent au sein de notre collectif et au-delà, qui n'attendent qu'à être assemblées. Au sein du domaine thématique des « flux agro-environnementaux » il existe même quelques initiatives de modélisation qui tendent vers une ambition similaire, comme le modèle MELODIE (Chardon et al., 2012) articulant en effet un « système de pilotage » et un « système biotechnique ». A part le fait que ce modèle-là se limite à l'échelle de l'exploitation, il est surtout un exemple d'efforts qui, dans ce domaine-là, consacrent encore assez peu de place à ce « système de pilotage » (ici un seul acteur gérant avec une stratégie d'optimisation des entités sous son contrôle total), tout comme aux besoins de l'utilisation d'un tel outil dans des démarches participatives.

Mais cette simulation conjointe représente probablement un défi technique. Si le niveau de la perception et de l'action se prête bien à un formalisme événementiel et multi-agent, ce choix risque de ne pas être si évident ni unique au niveau de l'actualité matérielle. Et l'articulation entre les deux par le biais des objets *material* relève d'une contradiction : du côté de l'action il s'agit d'abstractions de classe 4, tandis qu'au niveau métabolique la dynamique de la *matter* fera inévitablement évoluer leur composition au cours des actions, questionnant ainsi mécaniquement la validité de l'abstraction. C'est bien ainsi qu'en matière de gestion des effluents d'élevage, Robin et al. (2018) en viennent récemment à identifier la « nécessité de passer de catégories distinctes à une continuité de situation »⁶¹. Une complication technique – car il faudra établir une sorte de traçabilité de lots – qui représente un intérêt dans la démarche participative : elle représente un moyen pour sensibiliser les acteurs à la matérialité sous-jacente à leur représentation et elle peut informer les décisions (et leur représentation sous forme de règles dans le modèle). L'acteur – et l'agent le représentant dans le modèle – est ainsi placé devant un choix entre trois possibilités à chaque évolution d'un objet abstrait : soit il le juge insignifiant, soit il décide de l'ignorer en assumant les conséquences, soit il ajuste son action. Et dans les deux derniers cas il est en principe interrogé sur la pertinence du maintien de l'abstraction comme qualification de l'objet (un exemple prosaïque : est-ce que ce lot de « fumier » en est-il encore un, ou est-ce que la durée de stockage a été telle qu'il faudra désormais le considérer comme « compost de fumier » ?).

Il y a d'autres intérêts à une telle explicitation spatio-temporelle des instances appartenant – jusqu'à nouvel ordre donc – à la même catégorie d'objet *material*. Elle ne permettrait pas seulement de garder la trace des apports et des évolutions de matière en son sein qui seraient le fait du projet d'action, mais aussi de contextualiser cette trace-là par rapport à ce que l'objet pouvaient éventuellement

⁶¹ Robin et al. (2018) : « La gestion des effluents d'élevage fait traditionnellement appel à des « catégories d'effluents » (par exemple « lisiers », « fumiers ») pour faciliter les activités de recherche-développement, formation et conseil. Cette catégorisation sous-entend que les différences entre deux catégories dépassent clairement la variabilité intra-catégorie. Ce n'est pourtant pas le cas. Elle devrait donc être remise en cause pour considérer davantage de continuité entre les situations particulières. »

contenir par ailleurs et de ce que d'autres processus pourraient l'apporter. Ces derniers peuvent par exemple constituer une « contamination arrière-plan » que nous n'avons jusqu'alors pas encore pu considérer dans nos modèles, mais dont les indicateurs d'évaluation auront certainement besoin (cf. section III.B.2.c). Dans la thématique du recyclage agricole de résidus organiques, on peut par exemple penser à une instance de l'objet parcelle agricole ayant reçu/intégré au cours du temps des instances d'objets tels des fertilisants organiques et des engrais. Pour ces derniers, le suivi spatio-temporelle des instances permet d'estimer au mieux teneur et formes d'une matière d'intérêt tel l'azote (et d'ajuster l'apport ?). Tandis que pour la parcelle cela permet de garder la trace de l'origine par exemple de certains éléments trace, à mettre en regard e.g. d'éléments issus du fond géologique local ou d'apports autres, que ce soit par déposition atmosphérique, par flux hydrique ou au travers d'autres pratiques culturelles (e.g. phytosanitaires). Et si nous arrivions à relever ce défi technique il y aurait à la clé un outil qui permettrait de focaliser lors de la simulation tantôt sur les flux métaboliques, tantôt sur l'action territoriale : un outil novateur avec un potentiel pédagogique à explorer.

Quelques pistes de travail côté matter et côté material

Côté *matter*, il s'agit d'abord d'étendre le champ, par rapport à celui qui a été couvert jusqu'alors dans les modèles dits « de gestion », à ce sous-ensemble de l'actualité matérielle qu'est le métabolisme industriel. Ensuite il faudrait d'une part modéliser le devenir des matières d'intérêt au sein des matières-compartiment, et d'autre part assurer le lien (donc représenter la possible rétro-action) avec les métabolismes connexes, insérant ainsi l'ensemble isolé pour les besoins de la démarche de concertation au sein du réseau métabolique. J'estime que cette dernière piste se substitue au besoin plus classiquement évoqué d'un travail sur le changement d'échelle qu'entraîne souvent la conception qui réduit le concept de territoire à une échelle spatiale, et dont j'ai argumenté la pertinence limitée dans mon cadre (section III.B.1.d).

Du côté de la modélisation de l'action humaine nos travaux sont plus avancés. Mais les orientations que je propose demandent des avancées sur plusieurs pistes. Je n'en ai pas une vision exhaustive, mais il me semble qu'une avancée urgente serait de permettre aux flux matériels d'impacter l'action humaine. Développer une telle forme de rétro-action de la dynamique matérielle sur la décision me semble essentielle pour une simulation systémique longue durée crédible. Ainsi le changement de la composition d'un sol donné pourra par exemple, enfin, inciter l'agriculteur à changer de pratique. Et au-delà de la rétro-action directe cela amène à réfléchir à la modélisation de l'apprentissage. Dans UPUTUC par exemple, la pratique n'est pas qu'une fonction de critères rationnels comme coût, disponibilité, etc. Mais aussi d'un paramètre « préférence », lui-même fonction de la connaissance supposée de l'agent. Or, rien ne permet pour l'instant à cette connaissance d'évoluer, tandis que celle-ci dépend évidemment pour partie des événements ayant lieu dans son environnement.

A l'autre extrémité d'une graduation « d'urgence de mise en œuvre » se situe un travail sur l'inclusion d'autres « forces d'agir » comme acteurs. Un tel cadre de modélisation offre en effet des perspectives pour la réanimation du prématurément désanimé qu'appelait Latour (2015) ou, comme je l'appelais dans la section III.A.2, de considérer l'activité humaine parmi l'ensemble des potentialités actualisables dans tel ou tel morphologie physique.

Je rappelle par ailleurs que cette dimension-ci de la modélisation sera fortement mobilisée dans la recherche prévue en matière de définition – et certainement de simulation – de la promesse plausible et présentée sous la section portant sur la recherche en matière de co-construction (III.B.2.a).

J'estime qu'un modèle comme UPUTUC représente déjà une avancée pour l'écologie industrielle et territoriale dans le sens indiqué par Dijkema et al. (2015). Et des initiatives de couplage avec des modèles de flux de matière dans le sol actuellement portées par d'autres chercheurs de notre collectif ne sauront qu'accroître l'intérêt scientifique de l'outil. Mais si nous arrivons à mener à bien les chantiers que représentent les pistes listées ici, l'outil résultant à vocation à se diffuser largement au sein de la communauté de recherche et d'action en symbiose industrielle. Une diffusion qui par ailleurs devrait favoriser l'adoption de la FMFA (*Functional Matter Flow Analysis*, section III.B.1.b). Ces avancées seraient même plus généralement d'intérêt pour la communauté cherchant à faire émerger une « modélisation socio-écologique » n'ayant de cette modélisation encore qu'une conception très générale, jusqu'à parfois se résumer à une ambition de « modélisation intégrée » entre deux ensembles distincts⁶². Ignorant que la modélisation socio-écologique se pratique aussi en écologie « non-humaine » (e.g. Dammhahn et Kappeler, 2009), elle très largement considérée comme synonyme de « modélisation de système socio-écologique » – assimilant couplage de modèles à couplage de systèmes – où l'on fonde beaucoup d'espoir dans la modélisation à base d'agents (Rounsevell et al., 2011). Or, comme l'observent Filatova et al. (2013), cet intérêt pour la modélisation à base d'agents entraîne un focus excessif sur l'humain et un couplage avec des modèles dits biophysiques encore peu abouti : *« when being applied to study complex SES dynamics, ABMs focusing primarily on human behavior need to be integrated with other types of models. How is this integration implemented in terms of feedback mechanisms and software coupling? Integration of various modeling components is strenuous for any type of modeling, including ABMs. Often models are loosely coupled with one-way feedback between social and environmental systems. »* J'ai l'espoir que les pistes que j'identifie – dont notamment la simulation de flux à deux niveaux – finiront par être perçues comme une approche aboutie et bien fondée. En substituant l'idée de couplage de systèmes par celle des représentations distinctes mais couplées d'une seule et même réalité nous serions plus fidèles à l'orientation qu'un fondateur de la modélisation écologique que fut H.T. Odum en donnait voici longtemps déjà. *« Odum représente les processus artificiels et sociaux dans ses modélisations énergétiques ... Selon Odum, en effet, il n'y a pas de différence essentielle entre faits naturels et faits sociaux. Dans les deux cas, le même principe d'optimisation de l'usage des matières premières et de l'énergie est à l'œuvre. Qu'on le veuille ou non, les humains sont intervenus sur des écosystèmes primitivement vierges et, écrit Odum, les anciens systèmes et les nouveaux ont été réunis à l'intérieur d'un réseau global incluant usines et villes, récifs et étendues herbeuses, ainsi que tous les flux qui les relie. »* (dans Deléage, 1994).

c) « Evaluation » ?

Pour finir je retourne, enfin, au sujet qui constituait ma mission initiale. Cela en me plaçant dans un contexte d'action – une nouvelle démarche prospective et participative conforme au cadrage proposé – qui reste à créer, où l'évaluation, ou en ce qui nous concerne plutôt *l'aide* à l'évaluation, interviendrait cette fois au moment approprié au cours de la concertation, contrairement à ce que

⁶² L'institut d'écologie sociale de l'Université Alpen-Adria de Vienne par exemple, qui l'identifie comme un de ses axes de recherche, n'en dit juste ceci : « The thematic research area of socio-ecological modelling deals with the analysis of complex processes of society-nature interaction. The goal is to create computer models illustrating the interplay between decisions taken by different types of actors, socioeconomic processes and political and institutional framework conditions on the one hand and essential ecological patterns and processes on the other. » (<https://www.aau.at/en/social-ecology/research/integrated-socio-ecological-modelling/>)

nous avons réussi à faire dans le cas du projet GIROVAR. Sur le plan de la méthodologie nous avons toutefois déjà parcouru une partie du chemin (section II.D.2). Mais une partie seulement, car (1) les contraintes temporelles nous ont pour le moment empêché de déterminer et de tester les modalités de cette aide et (2) la posture et le cadrage proposés élargissent la portée de cette aide.

Désormais il s'agit de rendre *accessible* et *compréhensible* toutes les conséquences d'intérêt. Et dans la posture matérialiste que je me propose d'adopter, cela – *toutes* les conséquences d'intérêt – découle de changements de (flux de) matière : Les changements de la *matter* dont, à travers le *material*, l'acteur doit être informé. Où « intérêt » ne renvoie pas à la subjectivité d'un anthropocentrisme fort, mais bien à l'anthropocentrisme faible de Norton (1984) : il ne s'agit pas d'informer en fonction de ce que les acteurs *souhaitent* savoir, mais d'informer sur ce que l'on estime qu'il leur *faut* savoir dans le cadre de la démarche commune. L'ampleur de ce besoin-là découle du cadrage thématique, qui quant à lui dépend de la nature du problème qui a permis de mobiliser les acteurs dans une situation donnée. C'est ce que nous indiquions déjà pour les conséquences dites environnementales dans A-1, où les phénomènes d'intérêt découlaient in fine d'un ensemble de flux de matières considérées comme les « pressions environnementales », conforme au cadre classique Drivers-Pressures-State-Indicators-Response de l'OCDE.

L'ambition pour la suite sera donc d'informer sur *toutes* les conséquences matérielles – intentionnelles ou pas – des changements envisagés. Mais qu'est-ce qu'une « conséquence matérielle » ? A ce stade vous ne vous étonnez plus de l'absence du terme environnement dans le titre, mais en fait si, il s'agit bien de ce qu'on peut appeler d'une certaine manière des recherches dédiées à l'évaluation environnementale. « Environnement » revient en effet par la porte de la psychologie, de ce que Scholz (2011) appelle l'approche psychologique des relations homme-environnement, comme ce monde matériel extérieur à l'organisme, comme l'environnement d'un organisme que ce dernier perçoit par les sens : « *Environmental cues* [signaux] *are cues around a person that inform them what is happening and how to respond. Environmental cues are all of the sensory cues that exist in the environment. Environmental cues serve as the primary context that shapes how the world is perceived.* » Un « environnement » en relation étroite avec les discussions des sections III.A.2.a) et III.A.2.e), et la frontière ontologique que j'en déduisais.

Le modèle en lentille de Brunswik

La Figure III.8 et sa légende résument l'essentiel de ce que constitue le modèle en lentille du psychologue Egon Brunswik (1952), proposé par ce dernier pour tenter de représenter le fonctionnement de la relation qu'un organisme entretient avec son environnement. Toujours largement utilisé en sciences cognitives, il a depuis plus d'un demi-siècle été mobilisé par plusieurs autres disciplines comme par exemple en économie. L'intérêt que j'y vois pour des démarches participatives et prospectives comme celles de la symbiose industrielle facilitée mérite de s'y attarder un instant.

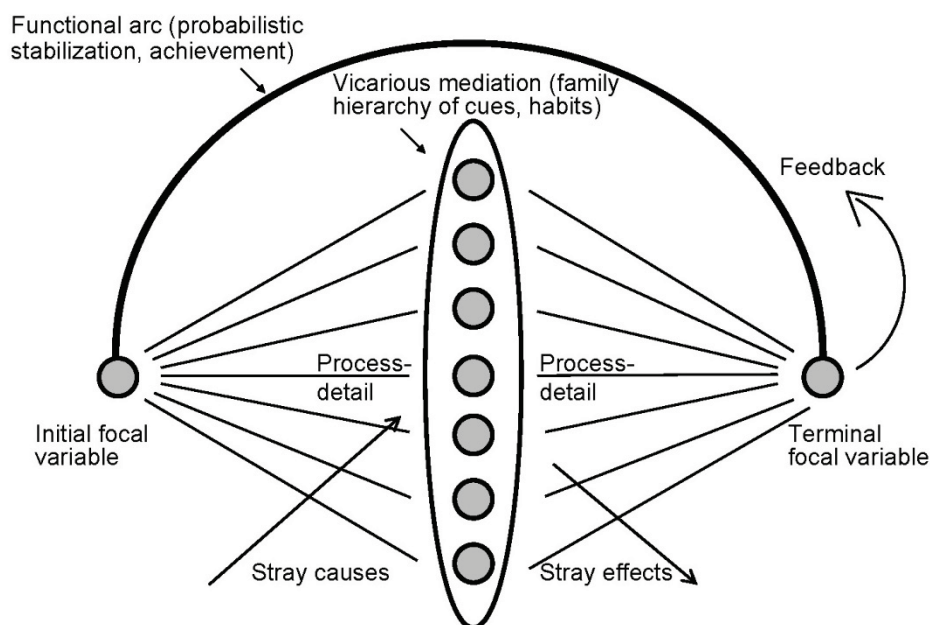


Figure III.8 Schéma du modèle en lentille, reproduit de Brunswik (1952, 20), mettant en contraste l'arc direct, univoque, fonctionnel entre la « variable focale initiale » – une entité matérielle ou son état – et la variable focale terminale – l'image mentale, donc l'interprétation faite de l'entité supposée réelle, avec le processus multicouches de la médiation indirecte et « par autrui » – partiellement substituable, à la fois redondant et complémentaire : les deux points de vue conduisent à une double focalisation. La « validité fonctionnelle » est une corrélation statistique entre l'action ou le jugement et respectivement le résultat ou la réalité. Au niveau du processus de lentille à proprement parler, Brunswik parle de « validité écologique » dans le cas d'un processus qui fournit à l'organisme les moyens précieux d'une interaction réussie avec l'environnement. L'efficacité de la lentille résulte de la combinaison d'informations imparfaites, incomplètes et plutôt préliminaires. Celles-ci constituent d'un côté (à gauche dans la figure) de « probables causes partielles » et de l'autre de « probables effets partiels ». Ils résultent de « stimuli distaux » et de « stimuli proximaux », par rapport à l'interface entre l'organisme et son environnement, la lentille au centre.

Le modèle en lentille ne doit pas être utilisé indépendamment des intentions originelles de Brunswik. Pour que l'objectif fonctionne, il doit y avoir des processus probabilistes non déterministes, ou en d'autres termes, une sorte d'activité dynamique. L'organisme nécessite donc une lentille (qui en soi doit être extrêmement ouverte à diverses fonctions) afin de faire face au « chaos » de son environnement : les probables causes et effets partiels et leurs stimuli distaux et proximaux traduisent l'idée que l'environnement est complexe et imparfaitement connaissable. La flèche retour d'information de la Figure III.8 indique qu'un processus de lentille n'est pas isolé ni statique, et traduit l'idée que le résultat du processus peut entraîner sa modification dans un état futur de l'organisme.

Ce modèle, dont le cadre probabiliste est compatible avec la nature prospective, post-normale, de notre démarche et son concept de promesse plausible, présente pour moi plusieurs intérêts. Il met tout d'abord le doigt sur le fait que l'évaluation environnementale est une activité continue et continuelle. Dans le cadre d'une démarche de co-construction, cela n'a donc pas de sens de ne l'envisager seulement qu'au moment où une solution aura été construite. Les acteurs le font tout au long de la démarche et c'est même ce qui la déclenche. Et c'est donc dès le début que le chercheur impliqué devra y contribuer. Bien plus que la seule évaluation de scénarios co-construits, estimer les conséquences matérielles sert donc à rendre le monde matériel extérieur à l'organisme « visible » pour

ce dernier. Il s'agit en quelque sorte de « constituer » l'environnement comme enveloppe dynamique, cadre de l'action de l'organisme. Une enveloppe composée d'informations sur ce qui pourrait affecter l'organisme et sur comment il pourrait répondre aux tendances que d'autres ou lui-même auront occasionné, ou l'intention d'occasionner. On retrouve là un accent sur la dynamique conforme à l'attention que je souhaite y consacrer dans la modélisation (cf. la sous-section précédente). Il ne s'agirait plus de comparer une situation nouvelle à une situation de départ, mais d'informer sur les processus en cours – afin d'apprécier la nécessité d'action – et sur les possibles effets d'une action sur ces processus – afin d'apprécier à la fois son efficacité et ses effets non anticipés.

J'identifie deux (principales) questions qu'une telle ambition nécessitera d'aborder. Une première concerne la « traduction » de flux matériels en information. Comme l'indique Brunswik, la variable focale initiale, « *L'objet écologique de la perception ou d'un acte comportemental manifeste* », n'est pas directement accessible au sujet. Ce qui fait de nouveau écho à une piste de recherche en matière de modélisation identifiée dans la sous-section précédente : le passage entre la simulation des flux de *matter* et celle des *materials*, objets d'action. Au travers des flux de *matter*, nous pouvons prétendre – d'un point de vue positiviste – avoir accès à l'évolution des *materials*, cette « sélection de compartiments » (cf. la sous-section précédente) qui constituent l'objet écologique de Brunswik. Une prétention qui nous confère la responsabilité de traduire les stimuli distaux, ce que j'associe à la dynamique du *matter*, en stimuli proximaux là où les premiers ne peuvent pas, ou pas encore, être perçus autrement. Cela dans le but d'assurer, d'augmenter sensiblement, la causalité d'une relation entre l'objet distal et le signal proximal, connue pour être souvent ambiguë et contradictoire. Voilà un début de piste pour commencer à décliner ce que nous désignons plus généralement par le terme indicateur. J'y reviendrai peu après. Mais la question me paraît cruciale, car en nous approchant de la lentille nous sommes contraint d'entrer dans un cadre fonctionnaliste et donc de faire ici un travail d'interprétation que nous aurons le plus possible retardé (cf. le principe énoncé en début de section III.A.2) tout en la sachant inéluctable. Produire des indicateurs revient à éclairer sur les fonctions que les changements matériels risquent d'affecter. Ces travaux-ci répondront donc aux questions de fond énoncées avant : a-t-on besoin d'interprétation et d'attribuer des fonctions ? Si oui, à quel moment précisément convient-il de passer à cette interprétation ? (cf. la section III.A.2.e) C'est aussi dans ces travaux-ci que nous pourrions être contraints de considérer si les signaux proximaux entrent dans une lentille à classification dichotomique. Cela pourrait justifier de mobiliser à ce stade ces concepts comme les « services écosystémiques », les « externalités à internaliser », ou justement déjà internalisées, et les « impacts environnementaux ».

Cette première question-là est d'autant plus importante que la réponse fournira un cadre au couplage de nos travaux positivistes avec la démarche constructiviste, nous aidant aussi à respecter la loi de Hume et à maîtriser la mobilisation de concepts de classe 4 : un cadre pour aider à déterminer où s'arrêter... Mais dans du travail-frontière (boundary work)⁶³ complexe la légitimité est essentielle : les chercheurs vus comme positivistes, associés à des disciplines essentiellement matérialistes (chimie, agronomie, pédologie), sont légitimes pour la quantification des « signaux » matériaux, les stimuli distaux. Le focus de cette aide à l'information est sur la production de la chaîne de stimuli causaux

⁶³ Défini par Clark et al. (2016) comme un processus de soutien à la négociation engagé dans la création de connaissances utilisables et dans la création de l'ordre social qui crée et utilise ces connaissances. Ils considèrent un travail-frontière comme étant complexe s'il fait intervenir de multiples sources de connaissance mobilisées dans une forme de négociation entre de multiples porteurs d'enjeu. Ils estiment par ailleurs que le focus sur la production d'objets-frontière augmente ses chances de succès et que ses objets-frontière doivent être adaptés voire spécifique au contexte.

distaux et proximaux : le corpus commun que reçoivent toutes les lentilles. Mais jusqu'où aller dans l'adjonction de stimuli proximaux pour la définition d'indicateurs ? L'exercice délicat consiste à faire comprendre les raisons expliquant la composition de ce corpus sans pour autant passer au travers de la lentille : donner les perches permettant à tous de faire le cheminement interprétatif des autres sans se substituer à eux en tentant de faire ses cheminements à leur place. On n'est ni compétent ni légitime pour le faire, et l'on risque l'accusation d'être instrumentalisé, endommageant notre neutralité, donc le processus.

La seconde question principale concerne le niveau auquel nous pensons devoir rendre compte de l'objet distal. Il conviendrait de raisonner la position dans une fourchette de niveaux possibles entre les extrêmes que sont l'agrégation au niveau du système territorial et la résolution la plus fine que les données disponibles permettraient d'atteindre. Le premier niveau correspond à l'approche la plus habituelle permettant de présenter un « bilan » synthétique, tandis que le second niveau est souvent pensé comme un idéal à atteindre. J'estime que les deux méritent d'être questionnés. Pour fournir un bon signal proximal à l'acteur, lui permettant d'identifier au mieux les moyens proximaux adéquats (de l'autre côté de la lentille), il se peut qu'il soit préférable de lui laisser le soin d'établir ce bilan lui-même. Et de la même manière la multiplication maximale de stimuli proximaux, gênant l'acteur dans l'établissement de ce bilan, peut entraîner une focalisation excessive sur un objet distal de son choix, comme par exemple un lieu qui le concerne personnellement ou une situation où les flux et leurs conséquences seraient exceptionnellement élevés.

Au-delà du raisonnement de cette position il se peut aussi que la réponse à cette seconde question soit celle d'une *multiplicité* de niveaux. Ce qui contient une piste originale : le focus sur le stimulus distal, l'état d'un compartiment donné à un moment donné tel que produit par les flux d'une matière donnée, ouvre des perspectives nouvelles. Comme je viens de l'indiquer, la logique prédominante consiste à renseigner des indicateurs par phénomène d'intérêt au niveau du « système » à l'étude, ce qui passe par l'agrégation de tous les flux d'une matière donnée dans toutes les instances d'un type de compartiment donné. Une information complémentaire, et très peu produite, consisterait à (faire) relier le stimulus distal d'une instance de compartiment donnée aux *divers* stimuli proximaux à qui il est relié. Une sorte de projection orthogonale qui n'agrège non plus par type de flux, mais par compartiment. Nous y serons confrontés à la difficulté d'un traitement équilibré des processus matériels au sein du système métabolique et de ceux liés aux flux entrant et sortant. Mais c'est une piste intéressante pour aborder le problème ancien, mais toujours esquivé dans les méthodes/outils d'évaluation, de l'interdépendance des indicateurs, sous l'angle de cette « médiation par autrui » entre de multiples stimuli proximaux.

Le modèle en lentille apporte deux autres enseignements : dans notre démarche on assimilerait le représentant d'un groupe d'acteurs à « l'organisme ». Mais le but politique de notre action est la constitution d'un collectif dans la finalité de faire coexister les différents « mondes » que sont justement ces différentes lentilles des groupes. Ce qui peut se traduire par l'ambition de faire évoluer l'arène vers un organisme-synthèse. Cela signifie qu'il importe de non pas informer distinctement chaque groupe au sujet des conséquences qui touchent à ses intérêts propres, mais d'informer tous sur tout et de la même manière. Car cela permettrait une « *vicarious mediation* » partagée voire commune qui contribuerait à établir l'intersubjectivité. Pour reprendre l'exemple des flux de composés organiques apportés au sol, considérés comme contaminants trace (A-5), nous y avons identifié leur possible détectabilité dans les parties aérienne de la culture comme stimulus proximal des industriels

du sucre, leur possible accumulation dans le sol au cours du temps comme stimulus proximal des planteurs et leur possible atteinte de nappes servant pour l'eau potable comme stimulus proximal des autorités locales. Il s'agirait d'« effacer » ces bénéficiaires et de fournir les trois stimuli proximaux à tous afin que cette « *vicarious mediation* » ait lieu entre eux et au sein de chacun. C'est la poursuite de ce que nous avons entamé dans le projet GIROVAR dont témoignent d'autres exemples : nos « évaluations » absolue et relative de la contribution au changement climatique, les différentes dimensions difficilement quantifiables de la fertilité ou encore les devenir incertains des CTO et ETM contribuant à l'appréciation de plusieurs risques.

Ce qui m'amène au second enseignement : il serait très intéressant voire nécessaire de collaborer dans ces recherches plus constructivistes avec les sciences sociales, ou même cognitives. Leurs recherches sur le côté « réactif », à droite dans la Figure III.8, complèteraient utilement les nôtres, en particulier en permettant d'en valider la pertinence ! Elles pourraient aussi fournir des indications de cette évolution vers l'intersubjectivité que nos travaux viseraient à promouvoir. Puis il serait bienvenu d'étudier ensemble les liens entre les variables focales initiales, qui toutes concernent l'ampleur de phénomènes matériels, et les variables focales terminales, qui quant à elles relèvent de différents domaines d'interprétation anthropocentrée (e.g. fonctionnalités sanitaire, économique, agronomique, écologique). Notamment parce que mieux connaître ces dernières peut aider dans la conception des stimuli proximaux. Et des chercheurs d'autres disciplines peuvent enfin, aussi en fonction du cadrage (section III.B.1), se joindre à nous pour travailler légitimement sur des stimuli proximaux situés en dehors du domaine d'activité humaine faisant partie de nos domaines thématiques.

Stimulus proximal et indicateur

Il importe de revenir un instant sur le concept d'indicateur, à la lumière du modèle en lentille de Brunswik. C'est un concept peu stabilisé et ambiguë (voir Heink et Kowarik, 2010) que nous avons déjà pu placer par le passé, lors de la thèse de François Dumoulin, dans un continuum « indicandum, indication, indicateur » (Heink et Kowarik, 2010) somme tout assez proche de la suite « variable focale, stimulus distal, stimulus proximal » de Brunswik, mais que finalement fort peu de travaux ont cherché à formaliser. Dans A-1 nous renvoyons sans considération critique aux travaux de Bockstaller et Girardin (2003), un des rares à avoir cherché à définir les critères que devraient satisfaire les indicateurs. Des auteurs qui attribuent une double fonction aux indicateurs : fournir de l'information et assister la prise de décision de gestion. Dans le cadre de nos démarches participatives il s'agit d'informer les représentants des groupes d'acteurs dans les arènes de concertation, mais d'ailleurs aussi les agents du modèle représentant ces acteurs – surtout une fois que nous aurons progressé en matière de représentation de l'apprentissage – de toutes les conséquences des actions envisagées/simulées. Sans différencier entre conséquences intentionnelles et « externalités » non pensées/voulues/recherchées. Car même pour les premières la nature et l'intensité de ces conséquences peuvent constituer un retour utile dans un contexte que Brunswik dénommait fonctionnalisme probabiliste. Où autant les raisons et motivations derrière le but poursuivi que la production d'information sur l'atteinte de ce but sont entachées d'incertitude.

Les percepteurs dans le modèle en lentille de Brunswik reçoivent des stimuli distaux et proximaux, deux choses que l'on combine généralement dans ce que nous appelons un indicateur, où le stimulus

distal est produit par le modèle métabolique du *matter* dans le *material*, interprété par un perceuteur, par l'adjonction d'information supplémentaire, au sein des arènes et du modèle de l'action humaine. Dans le projet GIROVAR nous avons ainsi couplé l'information sur un flux d'accumulation d'ETM dans le sol à des seuils réglementaires. Une pratique courante consiste à indexer le stimulus distal sur une échelle de valeurs connues par ailleurs. Bockstaller et Girardin (2003) estiment qu'un tel indicateur individuel doit être validé selon trois critères : ils incitent à considérer la validité et la conformité scientifique (« validation de la conception »), la fiabilité et la précision (« validation de sortie »), et son utilité pour les bénéficiaires (« validation de l'utilisation finale »). La première validation ressort dans nos démarches de la validation par l'arène technique d'une proposition des chercheurs. La validation de sortie a un faible potentiel empirique. L'essentiel reste de ne pas sacrifier la justesse à la précision, d'éviter tout biais. L'imprécision est acceptée et même jugée inévitable par le fonctionnalisme probabiliste, le tout étant de la qualifier. Où la « *vicarious mediation* » réduit du coup l'importance de la dernière, la validation de l'utilisation finale. L'identification préalable des phénomènes et flux de *matter* d'intérêt nous assure par ailleurs de la pertinence des cibles, les variables focales de Brunswik. L'indicateur ne peut donc se révéler impertinent, tout au plus de faible pertinence. Des multiples expériences de l'utilisation du modèle de lentille de Brunswik ressort effectivement un possible effet négatif de l'ajout d'indicateurs peu utiles sur la pertinence de la décision (Karelaia et Hogarth, 2008, évaluent 249 études s'appuyant sur le modèle de Brunswik et s'intéressant à des tâches et environnements très variés, réalisées sur 50 ans) : il faut une redondance utile sans perdre de vue le principe de parcimonie. Nous ne pourrions qu'en avoir une indication en nous intéressant à l'utilisation faite par les participants à la démarche. Mais il ne pourra y avoir d'ajustement pour le cas en question, et comme la production d'indicateurs est spécifique à chaque situation, l'information sur l'utilisation ne peut constituer un apprentissage. Deux observations supplémentaires concernent cette « validation de l'utilisation finale » : puisque le chercheur n'est pas politiquement neutre, l'information qu'il produit ne doit pas nécessairement être soumise à une validation par l'usage. Ce qui n'est pas en conflit avec le modèle de la lentille qui consiste en deux fonctions distinctes, séparant la description/prédiction de la variable focale du jugement par le récepteur. Et cette validation-là n'est pas indépendante des deux premières !

Il me semble donc pouvoir déduire de cette brève analyse que, dans le cadre de nos démarches, un indicateur individuel doit plus particulièrement faire l'objet d'une validation de sortie. Comme indiqué, l'essentiel reste de ne pas sacrifier la justesse à la précision. La précision concerne le stimulus distal, l'estimation des flux de matière, qui ne doit donc pas être caché dans le stimulus proximal. La justesse concerne quant à elle le stimulus proximal, i.e. l'information que l'on joint à celle qui porte sur le flux de matière permettant de l'interpréter comme étant lié à la variable focale terminale. Une telle validation renvoie donc au besoin indiqué ci-dessus de collaboration avec les sciences humaines et sociales.

Mais cette focalisation sur la validation de l'indicateur individuel laisse d'importantes questions de côté. Que faire de cela par exemple dans le cas, fréquent, de l'indicateur-composite ? On imagine que cette composition devrait faire l'objet d'une validation de conception supplémentaire, portant en particulier sur l'exhaustivité des composantes. Mais comment valider la sortie ? Voilà une importante question, car la validation de sortie de ses composantes ne vaut pas validation de sortie de l'ensemble. Je vois deux choix possibles : soit la dérivation d'un stimulus proximal unique à partir de l'ensemble de stimuli distaux, ce qui nécessite un modèle – validé lui aussi – permettant leur combinaison (à l'image des multiples *impact assessment methods* en ACV), soit laisser le soin de la composition à la « *vicarious*

mediation » en fournissant les indicateurs de composantes à la lentille de Brunswik. On peut par exemple penser que la première option serait préférable pour une variable focale terminale comme la fertilité du sol : en gardant la maîtrise de la combinaison des composantes on éviterait les travers d'une interprétation biaisée des parties. Et nous aurons l'occasion de tenter de sensibiliser à la relation entre ces deux ensembles si couramment considérés comme indépendants, les fonctions engrais et les effets amendants, ce à quoi nous appelions dans A-2. La seconde option pourrait par contre être intéressante à tester pour certains risques, comme un risque de pollution ou un risque de dommage (e.g. perte de rendement), à condition que les différents stimuli proximaux puissent aisément être comparés et combinés.

d) *Remarques sur les modalités pratiques de mise en œuvre*

J'ai fait le choix de dédier ce mémoire à une réflexion sur ma « science » ; aux besoins et aux ambitions scientifiques. En conséquence, les modalités pratiques de mise en œuvre n'y ont été que très succinctement abordées. Or, je conçois que le lecteur habitué au fonctionnement de la recherche « sur projets » puisse s'attendre à un mot sur ces derniers : sur la « traduction » des ambitions en projets.

Une première remarque concerne la discordance entre l'adjectif possessif utilisé à la première personne ci-dessus, propre à l'exercice de la sollicitation d'une l'Habilitation à Diriger des Recherches, et le programme esquissé, qu'il conviendrait de qualifier de « inter- et transdisciplinaire » (cf. e.g. Darbellay, 2015, exemple pris parmi toute une nouvelle vague de littérature sur l'ITD) : je veillerai à ce qu'il y aura des avancées sur les pistes identifiées, mais elles ne seront pas toujours de mon fait. Si je chercherai à les initier et impulser, je ne réaliserai, coordonnerai ou encadrerai des recherches moi-même que là où cela soit admis comme pertinent. J'y faisais allusion dans, par exemple, la section sur la co-construction (III.B.2.a).

Dans cette même section, j'indiquais que je n'aborde pas ici les difficultés pratiques liées à la mise en œuvre, sous forme de projet(s), d'une démarche « adaptative, tributaire d'orientations et de décisions prises au fil de l'eau » et idéalement assorti d'un accompagnement dans la durée. J'indiquais aussi que cela mérite réflexion, mais à l'heure actuelle ma stratégie est la suivante :

Plusieurs questions d'ordre méthodologique peuvent être abordées séparément dans des projets de recherche. Mon implication dans le projet ANR DIGESTATE (2016-2019) devrait ainsi permettre d'améliorer la représentation de la dynamique de certaines « matières fonctionnelles » (ETM, contaminants organiques et biologiques) au sein de certains matières « compartiment » (compost, digestat, sol), cf. la section III.B.2.b, tout comme d'aborder la question de leur traduction en indicateur (section III.B.2.c). Dans la section III.B.2.a, j'indique aussi que la question de l'initiation et de la formalisation d'une promesse plausible sera prochainement abordée dans le cadre d'un doctorat sous ma (co-) direction : il s'agit d'une thèse CIFRE avec Véolia, soumise à l'ANRT, qui s'appuie par ailleurs sur un terrain du projet Ademe PROTERR (2018-2020), la Plaine de Versailles ; un projet dont je coordonne l'acquisition des connaissances et informations pour le diagnostic.

Certaines autres questions méthodologiques pourront être abordées « hors projet », sur la base d'acquis. C'est le cas de certaines des « quelques pistes de travail côté *matter* et côté *material* » de la section sur la modélisation et la simulation (III.B.2.b), en s'appuyant sur UPUTUC, même si la transposition en cours de celui-ci sur le terrain de la Plaine de Versailles, avec mon collègue Jean-

Christophe Soulié, tout comme les travaux envisagé par ce dernier dans le cadre du projet Casdar GABiR (2017-2019) à la Réunion, y contribueront aussi.

Vient ensuite, ou plutôt en parallèle, le projet pour la nouvelle mise en œuvre, au Sud, de la démarche participative (mentionné dans la section III.B.1.b), support des recherches en matière de co-construction (section III.B.2.a) et d'évaluation (section III.B.2.c), et support d'application et de validation des avancées méthodologiques. Sous la conjoncture actuelle et après quelques tentatives infructueuses de montage d'un collectif interdisciplinaire n'ayant pas dépassé l'étape de « concept note » (e.g. Sustainable African FOod SYstems, Fondation Agropolis), l'approche suivie actuellement consiste à se tourner résolument vers les bailleurs, et plus largement les acteurs, du développement. Cela implique de mettre la co-construction et le système territorial en avant, sans y inclure, dans une seule proposition, toutes les recherches qui seraient pertinentes. Surtout, cela signifie un important travail proactif en amont de toute sollicitation de bailleurs.

Dans un premier temps, et c'est l'étape actuelle, il convient d'identifier une situation territoriale d'accueil. Pour convaincre, celui-ci se doit d'être relativement exemplaire, non seulement en termes des critères clés liés aux enjeux, déjà indiqués dans le cadrage géographique (section III.B.1.d), mais aussi en termes de gouvernance et de soutien de la part d'autorités locales. Cette prospection passe par des agences et bureaux régionaux. Elle n'a pas abouti à ce jour.

Une fois identifié, je me donnerai pour mission d'y établir un diagnostic préliminaire, en collaboration avec un partenaire de recherche local, puis de le partager avec les principaux acteurs concernés. Cela alimentera la justification du projet de développement et aboutira, conformément aux sections sur le cadrage thématique et géographique (III.B.1.c ; III.B.1.d), à la délimitation du système territorial, l'objet d'action autour duquel la proposition sera articulée.

C. Conclusion

Mes recherches passées m'ont progressivement amené sur la voie de la simulation et de l'estimation de flux de matières dans des situations à excédent croissant de résidus organiques : des recherches dédiées à l'information – et à l'émergence – d'initiatives territoriales prospectives, et forcément participatives. C'est une voie peu fréquentée, que je propose de continuer d'explorer, en collaboration étroite avec mes collègues de l'unité Recyclage & risque du CIRAD. Mes recherches récentes m'ont conduit à les revendiquer de l'écologie industrielle, tout en conduisant au constat que l'apport de cet abri « disciplinaire » reste encore faible. Il est principalement identitaire. Sur le plan méthodologique l'apport se limite à de grands principes, dont le bien fondé et l'universalité restent par ailleurs parfois discutables. L'intérêt de cette revendication réside donc pour partie dans la possibilité de contribuer à l'avancement de ce champ récent en parallèle de mes recherches.

La nature relativement apatride de ce qui constitue mon champ de recherches à moi m'a incité à saisir l'occasion du présent rapport pour en explorer puis poser les fondements. Sur le plan philosophique, cette exploration m'a conduit à une posture matérialiste et pragmatique. L'abandon de la dichotomie société – nature, estimée impraticable et inutile, est un autre élément clé de cette analyse. La déclinaison pratique m'amène à proposer des recherches à deux niveaux distincts, l'un analytique et de nature positiviste et l'autre qui englobe des travaux de frontière (*boundary work*), participatifs et de nature plus constructiviste. Où le premier ensemble s'intéresse à la matière au sens de *matter*, tandis que le second s'intéresserait aux matières fonctionnelles, les *materials*, les deux étant articulés par encapsulation, dans la représentation, du premier au sein du second. La délimitation du premier ensemble s'appuie sur ma définition du métabolisme industriel, potentiellement plus large que celle du « système territorial », l'extraction de la réalité constituant l'objet du second ensemble de travaux. Je fais aussi le constat que la recherche dédiée à la gestion des résidus organiques ne se limite pas strictement aux matières correspondantes, que ce soit au sens de *matter* ou de *material*, et je propose que toute délimitation thématique de l'objet des recherches soit spécifique au contexte d'intervention. Tout à fait possible donc que notre ambition de nous investir, plus ou moins collectivement, dans un territoire du Sud aux enjeux de type « excédent croissant de résidus organiques » débouche sur une délimitation de type système alimentaire territorial.

La présente exploration m'a conduit à ajouter quelques critiques des paradigmes de l'écologie industrielle à ceux déjà exprimés précédemment (A-4). Ils concernent en particulier la *Material Flow Analysis* et ses prétendus bilans matière, ainsi que la dogmatique circularité des matières. Cette dernière, ambition louable propre à l'économie (circulaire), n'est à mon sens pas à appliquer à l'écologie territoriale. Si cette économie et écologie sont souvent confondues, la seconde aurait à mon sens vocation à s'occuper aussi explicitement de flux perçus comme environnementaux – et à ce titre considérés comme externalités – par la première, et de la « connexion » aux métabolismes voisins. Comme de rares auteurs l'ont argumenté avant moi (Desrochers, 2005; Jensen et al., 2011; Spiegelman, 2003), l'ambition est l'insertion au sein de la biosphère et ses cycles biogéochimiques, et non pas la déconnexion. Le but de l'exploration présentée dans ce rapport est de dépasser la critique et de proposer des pistes concrètes pour mettre en œuvre les principes déduits. Je les ai déclinés selon trois axes, mais qui sont à l'évidence étroitement liés par endroit : la contribution à la co-construction de solutions, à la simulation des actions et des flux, et à l'estimation d'indicateurs pour l'évaluation par les acteurs.

Si cela donne l'impression d'une circonscription maîtrisée, les besoins de recherche identifiés sont nombreux. Et il s'agit là seulement de pas sur une – peut-être petite – portion visible de ces pistes. Au vu du nombre et de la diversité de questions à aborder, il serait préférable que ce programme ne concerne pas seulement moi-même et quelques collègues. Les propositions de projet, visant des résultats et des retombées concrètes en peu de temps, permettent de constituer des collectifs plus large, mais non pas d'aborder ces questions de fond. Voilà en conclusion ma motivation principale pour solliciter une Habilitation à Diriger des Recherches, car la direction de travaux de recherches apparaît comme la voie la plus appropriée pour faire progresser cette thématique en phase avec l'accroissement des enjeux sociétaux qu'elle représente. Et quel abri académique pourrait être plus approprié pour la faire prospérer que l'école doctorale nommée Gaïa, co-accréditée pour les sciences agronomiques et environnementales, et pour les sciences technologiques autour des domaines des matériaux de grande diffusion et de l'environnement, et qui se veut un véritable lien entre Recherche et Société ?

Un tel abri permettrait non seulement l'application, que j'estime urgente, de l'écologie industrielle aux territoires (pour partie) ruraux, mais aussi pour l'écologie industrielle de reconnaître davantage ses liens avec d'autres dynamiques scientifiques proches, portant sur cet objet de la gestion territoriale des matières, puis de les assimiler ou de les coupler. Je pense là notamment à l'agroécologie, car c'est bien sous ce vocable-là que nous cherchons à la promouvoir en interne au CIRAD. Et quelques indications suggèrent que, plus qu'ailleurs, le milieu académique français pourrait être prêt à envisager de bâtir ces ponts, peut-être du fait de la faiblesse relative de sa communauté en écologie industrielle, tout comme de sa force historique en approches territoriales. Ainsi Figuière et Metereau (Figuière and Metereau, 2012a, 2012b) s'étonnaient en 2012 de ne pas pouvoir identifier de recherche combinant explicitement les trois dimensions : secteur agroalimentaire, écologie industrielle (EI) et approche territoriale. Ils présument que « *dans une stratégie de développement rural localisé [DRL : terme préféré à, mais considéré synonyme de développement territorial], la combinaison du principe de circularité de l'EI avec les « démarches de type Syal », ouvre la perspective d'une forme durable et opérationnelle d'organisation de la production. Dans un contexte de mondialisation fortement défavorable à la paysannerie pauvre, l'ancrage local des très petites, petites et moyennes entreprises de l'agroalimentaire peut être un vecteur de sortie de la pauvreté. Ajoutant à cela l'impératif de durabilité des systèmes agroalimentaires, la combinaison EI/Syal fournit alors, en complément de pratiques agro-écologiques et de la mise en œuvre d'IFES (Integrated Food-Energy System) à l'échelle de la ferme ou de la coopérative (micro), un outil de base territoriale (méso) pour l'opérationnalisation d'un développement [ed. territorial] durable. Elle permet en effet l'endogénéisation de la dimension environnementale dès la conception des programmes de DRL. ... [Il s'agit d'envisager] l'EI comme le moyen de combiner les apports de trois propositions de natures différentes : le SYAL, l'IFES et l'agro-écologie. »*

Mais ces auteurs perçoivent encore l'écologie industrielle comme « *procédant par analogie avec les écosystèmes naturels* » ... Quittons enfin ce dogme clementsien dépassé du passage d'un système linéaire « juvénile » au système circulaire « mature » ! Regardons les écosystèmes, mais pas comme un modèle à suivre. Ce regard est à mettre au service de l'évolution de l'activité humaine en son sein. En 1866 Ernst Haeckel, biologiste allemand et généralement considéré comme le fondateur de l'écologie, désignait par écologie « la science des relations des organismes avec le monde environnant ». Le premier principe de l'écologie est que chaque être vivant est en relation continue avec tout ce qui constitue son environnement. L'écologie industrielle comme « l'écologie des

relations » – entre humains et non-humains – préconisé par Descola (2011), mais intégrant le « prématurément désanimé », ce à quoi appelait Latour (2015).

Récemment, Madelrieux et al. (2017a) relèvent eux aussi l'intérêt du développement d'une relation entre agronomie, et en particulier l'agroécologie, et l'écologie industrielle/territoriale, tout comme Dumont et al. (2013) avant eux. Sans proposer une démarche dans ce sens toutefois. Il est par ailleurs intéressant que les premiers distinguent bien deux types d'analyse des interactions entre filière agricoles et territoires, l'un s'intéressant aux flux de matières et l'autre aux flux de ressources matérielles, rappelant ainsi la section III.B.2.b) de ce rapport. Mais ceux-ci se rapporteraient respectivement à des enjeux « environnementaux » et socioéconomiques, considérés comme indépendants (Madelrieux et al., 2017b). Une conception qui contraste avec la mienne, où les deux types sont intimement liés puisque le second se résume à une interprétation fonctionnelle d'un sous-ensemble (le système territorial) du premier (le système métabolique). Un lien conceptuel que j'assorti d'une démarche opérationnelle de couplage.

J'estime que ma proposition permettrait de réaliser des recherches bien posées tout en permettant à cette écologie (industrielle) d'être une science impliquée (cf. Deléage et Coutellec, 2015). Ce que l'écologie industrielle serait par définition, même si elle éprouve des difficultés à aller au-delà de la déclaration d'intention. Une définition avec laquelle j'ai par ailleurs pris mes distances, mais avec laquelle ma proposition n'est pas nécessairement incompatible. Prenez par exemple la définition de l'étude du métabolisme industriel de Suren Erkman, pionnier de la divulgation de l'écologie industrielle dans la littérature francophone : « *l'étude des ensembles des composants biophysiques du système industriel. Cette démarche, essentiellement analytique et descriptive, vise à comprendre la dynamique des flux et des stocks de matière et d'énergie liées aux activités humaines, depuis l'extraction et la production des ressources jusqu'à leur retour inévitable, tôt ou tard, dans les processus biogéochimiques* » (Erkman, 1998). Une définition où l'on passe dans la même phrase de la dynamique de matière à la production de ressources, libérées quant à elles de toute dynamique biogéochimique. Ma proposition de modélisation à deux niveaux permettrait de les combiner. Mais aussi d'assurer une compatibilité avec de telles visions du monde, tout en préservant un espace de sensibilisation aux limites de ces visions pouvant entraîner leur inflexion. Car une science impliquée n'est pas une science neutre.

Et avant d'envisager la modélisation, ma proposition englobe aussi la définition pertinente du système épistémique en tant qu'étape initiale d'une démarche prospective (section III.B.2.a). Car ce « système industriel » d'Erkman n'est pas donné : c'est à mes yeux – et au moins aussi à ceux de Ray Ison – une construction instrumentale. Sur le point d'être abordé dans le cadre d'une thèse de doctorat, j'ai à cœur de formaliser et d'appliquer une démarche en ce sens, donnant corps à ce qui n'est encore qu'évoqué comme un principe, que ce soit par moi-même (A-4), à la suite de Descola (2011), et récemment par Madelrieux et al. (2017a). Ces derniers posent en effet le système territorial, en tant qu'objet de l'écologie territoriale, comme « le découpage artificiel, mais raisonné, d'un morceau de biosphère. » Sauf que ces raisonnements, je n'en ai pas encore vu.

Au-delà du bien fondé de mes intentions, j'espère aussi par ces arguments vous avoir convaincu de la nécessité de l'évolution appelée par le titre de ce rapport. Un appel qui véhicule l'espoir de voir émerger un collectif s'intéressant avec une posture matérialiste aux flux et à leur gestion au sein de territoires composites sous « pression matérielle ». Et si je précise « matérialiste », c'est pour appeler

les disciplines composant l'écologie au sens large – agronomes, géochimistes, modélisateurs – à s'inscrire dans une démarche complémentaire à celle déjà amorcée du côté de l'économie et de la géographie. Les enjeux scientifiques et sociétaux me semblent largement justifier une telle ambition. Une constitution de collectif qui me paraît par ailleurs tout à fait instrumentale, en constituant l'arène pour la dialectique nécessaire au progrès de cette science. Ce rapport n'y suffira sans doute pas, mais il se veut une pierre de – et un pavé lancé dans – une telle arène.

Bibliographie

- Abitbol, L., Blavot, C., Duret, B., Georgeault, L., Mat, N., Rault, M., Valluis, C., 2014. L'écologie industrielle et territoriale : le guide pour agir dans les territoires. Paris, France.
- Aiken, H.D., 1956. The Age of Ideology: the nineteenth century philosophers. The New American Library of World Literature, New York.
- Ashton, W., 2008. Understanding the organization of industrial ecosystems: A social network approach. *Journal of Industrial Ecology* 12, 34–51. doi:10.1111/j.1530-9290.2008.00002.x
- Baas, L.W., Boons, F.A., 2004. An industrial ecology project in practice: Exploring the boundaries of decision-making levels in regional industrial systems. *Journal of Cleaner Production* 12, 1073–1085. doi:10.1016/j.jclepro.2004.02.005
- Baraldi, A., Durieux, L., Simonetti, D., Conchedda, G., Holecz, F., Blonda, P., 2010. Automatic spectral rule-based preliminary classification of radiometrically calibrated SPOT-4/-5/IRS, AVHRR/MSG, AATSR, IKONOS/QuickBird/OrbView/GeoEye and DMC/SPOT-1/-2 imagery — Part I: System design and implementation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 48, 1299–1325.
- Barles, S., 2009. Urban Metabolism of Paris and Its Region. *Journal of Industrial Ecology* 13, 898–913. doi:10.1111/j.1530-9290.2009.00169.x
- Bassett, T.J., Peimer, A.W., 2015. Political ecological perspectives on socioecological relations. *Natures Sciences Sociétés* 23, 157–165. doi:10.1051/nss/2015029
- Batten, D.F., 2009. Fostering industrial symbiosis with agent-based simulation and participatory modeling. *Journal of Industrial Ecology* 13, 197–213. doi:10.1111/j.1530-9290.2009.00115.x
- Beddow, R., Costanza, R., Farley, J., Garza, E., Kent, J., Kubiszewski, I., Martinez, L., McCowen, T., Murphy, K., Myers, N., Ogden, Z., Stapleton, K., Woodward, J., 2009. Overcoming systemic roadblocks to sustainability: the evolutionary redesign of worldviews, institutions, and technologies. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 106, 2483–9. doi:10.1073/pnas.0812570106
- Berlin, I., 1956. The Age of Enlightenment: the eighteenth century philosophers.
- Bhaskar, R., 1997. A Realist Theory of Science. Verso Books, New York.
- Bockstaller, C., Girardin, P., 2003. How to validate environmental indicators. *Agricultural Systems* 76, 639–653.
- Boons, F., Chertow, M., Park, J., Spekkink, W., Shi, H., 2016. Industrial Symbiosis Dynamics and the Problem of Equivalence: Proposal for a Comparative Framework. *Journal of Industrial Ecology*. doi:10.1111/jiec.12468
- Boons, F., Howard-Grenville, J.A., 2009. The social embeddedness of industrial ecology. Edward Elgar Publishing.
- Boudon, R., 2008. Le relativisme. Presses Universitaires de France, Paris, France.
- Brent, A.C., Oelofse, S., Godfrey, L., 2008. Advancing the concepts of industrial ecology in South African institutions. *South African Journal of Science* 104, 9–12.
- Bruckmeier, K., 2013. Natural resource use and global change: New interdisciplinary perspectives in

- social ecology. Springer.
- Brunner, P.H., 2012. Substance Flow Analysis. *Journal of Industrial Ecology* 16, 293–295. doi:10.1111/j.1530-9290.2012.00496.x
- Brunner, P.H., Rechberger, H., 2004. Practical handbook of material flow analysis. Lewis Publishers, Boca Raton, FL.
- Brunswick, E., 1952. The conceptual framework of psychology. University of Chicago Press, Chicago, Illinois.
- Calame, P., 2009. Essai sur l'œconomie. Charles Léopold Mayer, Paris, France.
- Callon, M., 1986. Eléments pour une sociologie de la traduction. La domestication des coquilles Saint-Jacques et des marins-pêcheurs dans la baie de Saint-Brieuc. *L'année sociologique* 36, 169–208.
- Campbell, L.M., Gray, N.J., Hazen, E.L., Shackeroff, J.M., 2009. Beyond baselines: Rethinking priorities for ocean conservation. *Ecology and Society* 14, 14.
- Carolan, M.S., 2005. Society, Biology, and Ecology: Bringing Nature Back Into Sociology's Disciplinary Narrative Through Critical Realism. *Organization & Environment* 18, 393–421. doi:10.1177/1086026605281697
- Castán Broto, V., Allen, A., Rapoport, E., 2012. Interdisciplinary perspectives on urban metabolism. *Journal of Industrial Ecology* 16, 851–861. doi:10.1111/j.1530-9290.2012.00556.x
- Catton, W.R.J., Dunlap, R.E., 1980. A new ecological paradigm for post-exuberant sociology. *American Behavioral Scientist* 24, 15–47.
- Chardon, X., Rigolot, C., Baratte, C., Espagnol, S., Raison, C., Martin-Clouaire, R., Relier, J.-P., Le Gall, a, Dourmad, J.Y., Piquemal, B., Leterme, P., Paillat, J.M., Delaby, L., Garcia, F., Peyraud, J.L., Poupa, J.C., Morvan, T., Faverdin, P., 2012. MELODIE: a whole-farm model to study the dynamics of nutrients in dairy and pig farms with crops. *Animal : an international journal of animal bioscience* 6, 1711–21. doi:10.1017/S1751731112000687
- Chertow, M., Ehrenfeld, J., 2012. Organizing Self-Organizing Systems: Toward a Theory of Industrial Symbiosis. *Journal of Industrial Ecology* 16, 13–27. doi:10.1111/j.1530-9290.2011.00450.x
- Chertow, M.R., 2000. Industrial symbiosi: Literature and taxonomy. *Annual review of energy environment* 25, 313–337.
- Clark, W.C., Tomich, T.P., van Noordwijk, M., Guston, D., Catacutan, D., Dickson, N.M., McNie, E., 2016. Boundary work for sustainable development: Natural resource management at the Consultative Group on International Agricultural Research (CGIAR). *Proceedings of the National Academy of Sciences* 113, 4615–4622. doi:10.1073/pnas.0900231108
- Commons, J.R., 1950. Futurity, in: *The Economics of Collective Action*. University of Wisconsin Press, Madison (WI), USA, pp. 104–109.
- Congalton, R.G., 1991. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment* 37, 35–46.
- Costanza, R., Arge, R., Groot, R. De, Farber, S., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., Neill, R.V.O., 1997. The value of the World's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387, 253–260.
- Courdier, R., Guerrin, F., Andriamasinoro, F.H., Paillat, J., 2002. Agent-based simulation of complex systems: Application to collective management of animal wastes. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 5.
- Cronon, W.J., 1995. The trouble with Wilderness; or, getting back to the wrong nature, in: Cronon, W.J. (Ed.), *Uncommon Ground: Rethinking the Human Place in Nature*. W.W. Norton & Co., New York, pp. 69–90.
- Dammhahn, M., Kappeler, P.M., 2009. Females go where the food is: does the socio-ecological model

- explain variation in social organisation of solitary foragers? *Behavioral Ecology and Sociobiology* 63, 939–952. doi:10.1007/s00265-009-0737-2
- Darbellay, F., 2015. Rethinking inter- and transdisciplinarity: Undisciplined knowledge and the emergence of a new thought style. *Futures* 65, 163–174. doi:10.1016/j.futures.2014.10.009
- Daré, W., Van Paassen, A., Ducrot, R., Mathevet, R., Queste, J., Trebuil, G., Barnaud, C., 2010. Apprentissage des interdépendances et des dynamiques, in: Etienne, M. (Ed.), *La Modélisation D’accompagnement: Une Démarche Participative En Appui Au Développement Durable*. Editions Quae, Versailles, France, pp. 223–250.
- David, A., 2000. La recherche intervention, un cadre général pour les sciences de gestion ?, in: David, A., Hatchuel, A., Laufer, R. (Eds.), *Les Nouvelles Fondations Des Sciences de Gestion*. Vuibert-Fnege, Paris, France, pp. 193–213.
- Deléage, J.-P., 1994. *Une histoire de l’écologie*. Seuil, Paris, France.
- Deléage, J.-P., Coutellec, L., 2015. L’écologie scientifique, une science impliquée ? *Ecologie & politique* 51, 55–64. doi:10.3917/ecopo.051.0055
- Descola, P., 2011. *L’écologie des autres. L’anthropologie et la question de la nature*. Éditions Quae, Paris, France.
- Descola, P., 2000. L’anthropologie et la question de la nature, in: Abélès, M., Charles, L., Jeudy, H.P., Kalaora, B. (Eds.), *L’environnement En Perspective. Contexte et Représentations de L’environnement*. L’Harmattan, Paris, pp. 61–83.
- Desrochers, P., 2005. Learning from history or from nature or both? Recycling networks and their metaphors in early industrialisation. *Progress in Industrial Ecology* 2, 19–34. doi:10.1504/PIE.2005.006777
- Dijkema, G.P.J., Xu, M., Derrible, S., Lifset, R., 2015. Complexity in Industrial Ecology: Models, Analysis, and Actions. *Journal of Industrial Ecology* 19, 189–194. doi:10.1111/jiec.12280
- Do, K.L., 2003. *L’exploration du dialogue de Bohm comme approche d’apprentissage: une recherche collaborative*. Université Laval.
- Doré, T., Malézieux, E., Trébuil, G., 2011. Comment l’évolution des systèmes alimentaires interroge-t-elle l’agronomie ? *Agronomie, Environnement & Société* 1, 37–48. doi:10.1017/CBO9781107415324.004
- Douthwaite, B., de Haan, N.C., Manyong, V., Keatinge, D., 2002. Blending “hard” and “soft” science: the “follow-the-technology” approach to catalyzing and evaluating technology change. *Conservation Ecology* 5, 13.
- Dumont, B., Fortun-Lamothe, L., Jouven, M., Thomas, M., Tichit, M., 2013. Prospects from agroecology and industrial ecology for animal production in the 21st century. *Animal* 7, 1028–1043. doi:10.1017/S1751731112002418
- Dumoulin, F., 2016. *Evaluation environnementale d’un projet de symbiose industrielle territoriale*. Université de la Réunion.
- Duru, M., Therond, O., Fares, M., 2015. Designing agroecological transitions; A review. *Agronomy for Sustainable Development* 35, 1237–1257. doi:10.1007/s13593-015-0318-x
- Easterling, W.E., Weiss, A., Hays, C.J., Mearns, L.O., 1998. Spatial scales of climate information for simulating wheat and maize productivity: the case of the US Great Plains. *Agricultural and Forest Meteorology* 90, 51–63. doi:10.1016/S0168-1923(97)00091-9
- Eckersley, R., 2005. Translating science and restoring our sense of wonder : The end of nature as a landmark. *Organization Environment* 18, 193–197. doi:10.1177/1086026605276005
- Erb, K.H., 2012. How a socio-ecological metabolism approach can help to advance our understanding

- of changes in land-use intensity. *Ecological Economics* 76, 8–14. doi:10.1016/j.ecolecon.2012.02.005
- Erkman, S., 1998. Vers une écologie industrielle, comment mettre en pratique le développement durable dans une société hyper industrielle ? Institut Charles Léopold Mayer, Lausanne.
- Figuière, C., Metereau, R., 2012a. Au carrefour de l'écologie industrielle et du Syl. Faire progresser la durabilité d'un développement rural localisé., in: XXVIII Journées Du Développement de l'Association Tiers-Monde. Orléans, France, p. 17.
- Figuière, C., Metereau, R., 2012b. Ecologie industrielle : le secteur agroalimentaire comme point de départ pour une organisation écosystémique des activités humaines, in: Colloque Inter-Disciplinaire Sur L'écologie Industrielle et Territoriale (COLEIT). Troyes, France, p. 14.
- Filatova, T., Verburg, P.H., Parker, D.C., Stannard, C.A., 2013. Spatial agent-based models for socio-ecological systems: Challenges and prospects. *Environmental Modelling & Software* 45, 1–7. doi:10.1016/j.envsoft.2013.03.017
- Fischer-Kowalski, M., Steinberger, J.K., 2011. Visions for Industrial Ecology - social metabolism and hybrid structures. *Journal of Industrial Ecology* 15, 641–679.
- Folke, C., 2006. Resilience: The emergence of a perspective for social-ecological systems analyses. *Global Environmental Change* 16, 253–267. doi:10.1016/j.gloenvcha.2006.04.002
- Folke, C., Biggs, R., Norström, A. V., Reyers, B., Rockström, J., 2016. Social-ecological resilience and biosphere-based sustainability science. *Ecology and Society* 21, 41. doi:10.5751/ES-08748-210341
- Folke, C., Gunderson, L., 2012. Reconnecting to the biosphere: A social-ecological renaissance. *Ecology and Society* 17, 3–4. doi:10.5751/ES-05517-170455
- Foster, J.B., 2000. Marx's ecology: materialism and nature. Monthly Review Press, New York.
- Foster, J.B., 1999. Marx's theory of metabolic rift : Classical foundations for environmental sociology. *American Journal of Sociology* 105, 366–405.
- Foster, J.B., Burkett, P., 2000. The Dialectic of Organic/Inorganic Relations: Marx and the Hegelian Philosophy of Nature. *Organization & Environment* 13, 403–425. doi:10.1177/1086026600134002
- Frosch, R. a, 1992. Industrial ecology: a philosophical introduction. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 89, 800–3.
- Funtowicz, S., Ravetz, R., 1993. Science for the post-normal age. *Futures* 25, 739–755. doi:10.1016/0016-3287(93)90022-L
- Galloway, J.N., Aber, J.D., Erisman, J.W., Seitzinger, S.P., Howarth, R.W., Cowling, E.B., Cosby, B.J., 2003. The nitrogen cascade. *Bioscience* 53, 341–356.
- Gerber, P., Chilonda, P., Franceschini, G., Menzi, H., 2005. Geographical determinants and environmental implications of livestock production intensification in Asia. *Bioresource technology* 96, 263–76. doi:10.1016/j.biortech.2004.05.016
- Gerber, P., Vellinga, T., Opio, C., Steinfeld, H., 2011. Productivity gains and greenhouse gas emissions intensity in dairy systems. *Livestock Science* 139, 100–108. doi:10.1016/j.livsci.2011.03.012
- Gerber, P.J., Steinfeld, H., Henderson, B., Mottet, A., Opio, C., Dijkman, J., Falcucci, A., Tempio, G., 2013. Tackling climate change through livestock: a global assessment of emissions and mitigation opportunities. FAO, Rome, Italy.
- Godelier, M., 1984. L'Idéal et le matériel. Editions Fayard, Paris.
- Greenland, D.J., 1980. Organic recycling in agriculture: some research needs, in: Organic Recycling in Africa. FAO Soils Bulletin 43. FAO, Rome, pp. 230–234.

- Guerrin, F., 2008. Modelling agricultural production systems using an action-flow-stock ontology, in: International Workshop on Modelling & Applied Simulation (MAS 2008). Amantea, Italy, pp. 7–12.
- Guerrin, F., 2001. MAGMA: a simulation model to help manage animal wastes at the farm level. *Computers and Electronics in Agriculture* 33, 35–54.
- Guerrin, F., Paillat, J.M., 2003. Modélisation des flux de biomasse et des transferts de fertilité - cas de la gestion des effluents d'élevage à l'île de la Réunion. Restitution des travaux de l'Atp 60/99. Actes du séminaire des 19-20 juin 2002. CIRAD, Montpellier, France.
- Haberl, H., Erb, K.-H., Gaube, V., Gingrich, S., Singh, S.J., 2013. Socioeconomic metabolism and the human appropriation of net primary production: What promise do they hold for LTSE?, in: Singh, S.J., Haberl, H., Chertow, M.R., Mirtl, M., Schmid, M. (Eds.), *Long Term Socio-Ecological Research: Studies in Society-Nature Interactions*. Springer, Dordrecht, the Netherlands, pp. 29–52.
- Hall, M.H.P., 2011. A preliminary assessment of socio-ecological metabolism for three neighborhoods within a rust belt urban ecosystem. *Ecological Modelling* 223, 20–31. doi:10.1016/j.ecolmodel.2011.08.018
- Hatchuel, A., Molet, H., 1986. Rational modelling in understanding and aiding human decision-making: About two case studies. *European Journal of Operational Research* 24, 178–186.
- Heijungs, R., 2012. Spatial differentiation, GIS-based regionalization, hyper- regionalization, and the boundaries of LCA, in: Ioppolo, G. (Ed.), *Environment and Energy*. FrancoAngeli, Milano, Italy, pp. 165–176.
- Heink, U., Kowarik, I., 2010. What are indicators? On the definition of indicators in ecology and environmental planning. *Ecological Indicators* 10, 584–593. doi:10.1016/j.ecolind.2009.09.009
- Hélias, A., 2016. Contribution à l'usage et au développement de l'Analyse du Cycle de Vie. Université de Montpellier. doi:10.13140/RG.2.1.3639.2563
- Herrero, M., Thornton, P.K., Gerber, P., Reid, R.S., 2009. Livestock, livelihoods and the environment: understanding the trade-offs. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 1, 111–120. doi:10.1016/j.cosust.2009.10.003
- Hervé, D., Laloë, F., 2009. Questions sur la modélisation à l'interface entre natures et sociétés, in: Hervé, D., Laloë, F. (Eds.), *Modélisation de L'environnement : Entre Natures et Sociétés*. Editions Quae, Versailles, France, pp. 21–28.
- Holm, P., 1999. The dynamics of institutionalization: Transformation processes in Norwegian fisheries. *Administrative Science Quarterly* 40, 398–442.
- Horváth, P., Jermyn, I.H., Kato, Z., Zerubia, J., 2006. An Improved "Gas of Circles" Higher-Order Active Contour Model and Its Application to Tree Crown Extraction. Springer, Berlin, pp. 152–161.
- Hume, D., 1738. *A Treatise of Human Nature*. John Noon, London, UK.
- Ison, R., 2008. Methodological challenges of trans-disciplinary research: some systemic reflections. *Natures Sciences Sociétés* 16, 241–251. doi:10.1051/nss
- Ison, R.L., 2016. Transforming nature-society relations through innovations in research praxis: A co-evolutionary systems approach, in: Hubert, B., Mathieu, N. (Eds.), *Interdisciplinarités Entre Natures et Sociétés*. Peter Lang, Brussels, pp. 47–70. doi:http://dx.doi.org/10.3726/978-3-0352-6633-7
- Jarosz, L., 2008. The city in the country: Growing alternative food networks in Metropolitan areas. *Journal of Rural Studies* 24, 231–244. doi:10.1016/j.jrurstud.2007.10.002
- Jenny, H., 1941. *Factors of soil formation - A system of quantitative pedology*. McGraw-Hill, New York.
- Jensen, P.D., Basson, L., Leach, M., 2011. Reinterpreting industrial ecology. *Journal of Industrial Ecology*

- 15, 680–692. doi:10.1111/j.1530-9290.2011.00377.x
- Joireman, J.A., Lasane, T.P., Bennett, J., Richards, D., Solaimani, S., 2001. Integrating social value orientation and the consideration of future consequences within the extended norm activation model of proenvironmental behaviour. *The British Journal of Social Psychology* 40, 133–155.
- Jollivet, M., 2009. Éléments de théorie pour une recherche interdisciplinaire sur les interfaces natures/sociétés, in: Hervé, D., Laloë, F. (Eds.), *Modélisation de L'environnement : Entre Natures et Sociétés*. Editions Quae, Versailles, France, pp. 9–20.
- Karelaia, N., Hogarth, R.M., 2008. Determinants of linear judgment: A meta-analysis of lens model studies. *Psychological Bulletin* 134, 404–426. doi:10.1037/0033-2909.134.3.404
- Kay, S., Léo, O., Peedell, S., Giardino, G., 1998. Computer-assisted recognition of Olive trees in digital imagery, in: ISPRS Conference, Commission VII, Working Group 4. Budapest.
- Latour, B., 2015. *Face à Gaïa, Les Empêch.* ed. La Découverte, Paris, France.
- Latour, B., 1993. *We have never been modern*. Harvard University Press, Cambridge, MA, USA.
- Le Berre, M., 1995. Territoires, in: Pumain, D. (Ed.), *Encyclopédie de Géographie*. Economica, Paris, France, pp. 601–622.
- Le Moigne, J.L., 1995. *Les épistémologies constructivistes, Que sais-j.* ed. Presses Universitaires de France, Paris, France.
- Leeuwis, C., 2000. Reconceptualizing participation for sustainable rural development: Towards a negotiation approach. *Development and Change* 31, 931–959. doi:10.1111/1467-7660.00184
- Legay, J.-M., 1997. *L'expérience et le modèle. Un discours sur la méthode*. Editions INRA, Sciences en question, Paris, France.
- Legay, J.-M., Deffontaines, J.-P., 1992. Complexité, observation et expérience, in: Jollivet, M. (Ed.), *Sciences de La Nature, Sciences de La Société. Les Passeurs de Frontières*. Editions CNRS, Paris, France, pp. 477–484.
- Lévêque, C., 2013. *L'écologie est-elle encore scientifique ?* Editions Quae, Paris, France.
- Liu, J., Dietz, T., Carpenter, S.R., Alberti, M., Folke, C., Moran, E., Pell, A.N., Deadman, P., Kratz, T., Lubchenco, J., Ostrom, E., Ouyang, Z., Provencher, W., Redman, C.L., Schneider, S.H., Taylor, W.W., 2007. Complexity of coupled human and natural systems. *Science* 317, 1513–6. doi:10.1126/science.1144004
- Madelrieux, S., Buclet, N., Lescoat, P., Moraine, M., 2017a. Écologie et économie des interactions entre filières agricoles et territoire : Quels concepts et cadre d'analyse ? *Cahiers Agricultures* 26, 24001. doi:10.1051/cagri/2017013
- Madelrieux, S., Buclet, N., Lescoat, P., Moraine, M., 2017b. Caractériser les formes d'interaction entre filières agricoles et territoires: quelles méthodes ? *Cahiers Agricultures* 26, 24002. doi:10.1051/cagri/2017014
- Maris, V., 2010. *Philosophie de la biodiversité: Petite éthique pour une nature en péril*. Buchet Chastel.
- Marr, D., 1982. *Vision*. Freeman, New York.
- Marsh, G.P., 1864. *Man and nature*. C. Scribner, New York.
- Masson, J., Soille, P., Mueller, R., 2004. Tests with VHR images for the identification of olive trees and other fruit trees in the European Union. pp. 23–36.
- Mathevet, R., Bousquet, F., 2014. *Résilience & Environnement*. Buchet/Chastel, Paris.
- McInerny, R., 1982. *Ethica Thomistica: The moral philosophy of Thomas Aquinas*, 2nd ed. The Catholic University of America Press, Washington D.C.

- McKibben, B., 1989. *The end of nature*. Random House, New York.
- Mesle, C.R., 2008. *Process-relational philosophy: an introduction to Alfred North Whitehead*. Templeton Foundation Press, West Conshohocken.
- Mill, J.S., 1874. *Nature, The utility of religion, and Theism*. Longmans, Green, Reader, and Dyer, London.
- Mollinga, P.P., 2010. Boundary work and the complexity of natural resources management. *Crop Science* 50, S1–S9. doi:10.2135/cropsci2009.10.0570
- Monbiot, G., 2014. *Feral*. Penguin Books, London.
- Moore, G.E., 1903. *Principia Ethica*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Moore, J.W., 2011. Transcending the metabolic rift: a theory of crises in the capitalist world-ecology. *Journal of Peasant Studies* 38, 1–46. doi:10.1080/03066150.2010.538579
- Moore, J.W., 2000. Environmental Crises and the Metabolic Rift in World-Historical Perspective. *Organization & Environment* 13, 123–157. doi:10.1177/1086026600132001
- Morel, V., Deboudt, P., Deldrève, V., Longuépée, J., Maillefert, M., Masson, E., Meur-Férec, C., Petit, O., Zuindeau, B., 2010. Les risques environnementaux: Lectures disciplinaires et champs de recherche interdisciplinaires, in: *Risque Environnemental et Action Collective—Application Aux Risques Industriels et D'érosion Côtière Dans Le Pas-de-Calais*. Lavoisier, Paris, France, pp. 7–30.
- Moriconi-Ebrard, F., Denis, E., Harre-roger, D., Chatel, C., Thiam, O., Séjourné, M., 2008. *Africapolis* (English version): Urbanization study in West Africa (1950–2020). Paris, France.
- Morton, T., 2009. *Ecology without Nature: Rethinking environmental aesthetics*. Harvard University Press, Cambridge, MA, USA.
- Moscovici, S., 1972. *La société contre nature*. Union générale d'édition, Paris, France.
- Mount, P., 2012. Growing local food: Scale and local food systems governance. *Agriculture and Human Values* 29, 107–121. doi:10.1007/s10460-011-9331-0
- Moussa, R., Voltz, M., Andrieux, P., 2002. Effects of the spatial organization of agricultural management on the hydrological behaviour of a farmed catchment during flood events. *Hydrological Processes* 16, 393–412. doi:10.1002/hyp.333
- Naylor, R., Steinfeld, H., Falcon, W., Galloway, J., Smil, V., Bradford, E., Alder, J., Mooney, H., 2005. Losing the links between livestock and land. *Science* 310, 1621–1622. doi:10.1126/science.1117856
- Norton, B.G., 1984. Environmental ethics and weak anthropocentrism. *Environmental Ethics* 6, 131–148.
- OCDE/FAO/FENU, 2017. *Adopter une approche territoriale dans les politiques de sécurité alimentaire et nutritionnelle*. Editions OCDE, Paris. doi:http://dx.doi.org/10.1787/9789264272439-fr
- OECD, 2008. *Measuring Material Flows and Resource Productivity, Volume I: the OECD Guide*. Paris, France.
- Ostrom, E., 2009. A general framework for analyzing sustainability of social-ecological systems. *Science* 325, 419–422.
- Pahl Wostl, C., 2007. The implications of complexity for integrated resources management. *Environmental Modelling & Software* 22, 561–569. doi:10.1016/j.envsoft.2005.12.024
- Paillat, J.M., Guerrin, F., 2011. Combining individual and collective management of animal manure to reduce environmental impacts on a territory scale, in: *19th International Congress on Modelling and Simulation (Modsim)*. Perth, Australia, pp. 843–849.
- Paquin, R., Howard-Grenville, J., 2009. Facilitating regional industrial symbiosis: Network growth in the UK's National Industrial Symbiosis Programme, in: Boons, F.A., Howard-Grenville, J. (Eds.), *The*

- Social Embeddedness of Industrial Ecology. Edward Elgar Publishing, London, UK, pp. 103–127. doi:10.1111/j.1530-9290.2011.00437.x
- Paquin, R.L., Howard-Grenville, J., 2012. The Evolution of Facilitated Industrial Symbiosis. *Journal of Industrial Ecology* 16, 83–93. doi:10.1111/j.1530-9290.2011.00437.x
- Pauly, D., 1995. Anecdotes and the shifting baseline syndrome of fisheries. *Trends in Ecology & Evolution* 10, 430. doi:10.1016/S0169-5347(00)89171-5
- Peirce, C.S., 1879. Comment rendre nos idées claires. *la Revue philosophique de la France et de l'étranger* 4, 39–57.
- Perrin, G., Descombes, X., Zerubia, J., 2006. A Non-Bayesian Model for Tree Crown Extraction using Marked Point Processes.
- Perrin, G., Descombes, X., Zerubia, J., 2005. A marked point process model for tree crown extraction in plantations. pp. 661–664.
- Pohl, C., Hirsch Hadorn, G., 2008. Methodological challenges of transdisciplinary research. *Natures Sciences Sociétés* 16, 111–121. doi:10.1051/nss:2008035
- Pohl, C., Hirsch Hadorn, G., 2007. Principles for designing transdisciplinary research. oekom verlag, Munich, Germany. doi:ISBN 978-3-86581-046-5
- Rastoin, J.L., 2014. Les systèmes alimentaires territorialisés: Quelle contribution à la sécurité alimentaire ? *Comptes Rendus de l'Académie de l'Agriculture* 100, 29–31.
- Requier-Desjardins, D., 2010. L'évolution du débat sur les SYAL : le regard d'un économiste. *Revue d'économie régionale & urbaine* 4, 651–668. doi:10.3917/reru.104.0651
- Rivera-Ferre, M.G., López-i-Gelats, F., Howden, M., Smith, P., Morton, J.F., Herrero, M., 2016. Reframing the climate change debate in the livestock sector: mitigation and adaptation options. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change* 7, 869–892. doi:10.1002/wcc.421
- Robbez-Masson, J.M., Foltete, J.C., 2005. Localising missing plants in squared-grid patterns of discontinuous crops from remotely sensed imagery. *Computers & Geosciences* 31, 900–912.
- Robin, P., Paillat, J.-M., Lorinquer, E., Aubert, C., Toudic, A., Farinet, J.L., Cluzeau, D., Ponchant, P., Levasseur, P., Le Bris, B., Capdeville, J., Oudart, D., Akkal-Corfini, N., Hassouna, M., 2018. Procédés et traitements par compostage des effluents d'élevages, in: *Le Compostage*. Lavoisier, Paris.
- Robinson, T.P., P.K., T., Franceschini, G., Kruska, R.L., Chiozza, F., Notenbaert, A., Cecchi, G., Herrero, M., Epprecht, M., Fritz, S., You, L., Conchedda, G., See, L., 2011. Global livestock production systems. FAO-ILRI, Rome, Italy.
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, F.S., Lambin, E.F., Lenton, T.M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H.J., Nykvist, B., de Wit, C.A., Hughes, T., van der Leeuw, S., Rodhe, H., Sörlin, S., Snyder, P.K., Costanza, R., Svedin, U., Falkenmark, M., Karlberg, L., Corell, R.W., Fabry, V.J., Hansen, J., Walker, B., Liverman, D., Richardson, K., Crutzen, P., Foley, J.A., 2009. A safe operating space for humanity. *Nature* 461, 472–475. doi:10.1038/461472a
- Rosa, I.M.D., Ahmed, S.E., Ewers, R.M., 2014. The transparency, reliability and utility of tropical rainforest land-use and land-cover change models. *Global Change Biology* 20, 1707–1722. doi:10.1111/gcb.12523
- Rounsevell, M.D.A., Robinson, D.T., Murray-Rust, D., 2011. From actors to agents in socio-ecological systems models. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences* 367, 259–269.
- Sayer, J.A., Campbell, B., 2002. Research to integrate productivity enhancement, environmental protection, and human development. *Conservation Ecology* 5, 32.
- Scholz, R.W., 2011. Environmental literacy in Science and Society: from knowledge to decisions.

- Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Schoon, M., van der Leeuw, S., 2015. The shift toward social-ecological systems perspectives: insights into the human-nature relationship. *Natures Sciences Sociétés* 23, 166–174. doi:10.1051/nss/2015034
- Seguin, B., Itier, B., 1983. Using midday surface temperature to estimate daily evaporation from satellite thermal IR data. *International Journal of Remote Sensing* 4, 371–383.
- Seitzinger, S., 2010. A sustainable planet needs scientists to think ahead. *Nature* 468, 601.
- Séré, C., Steinfeld, H., 1996. World livestock production systems. Current status, issues and trends. *Animal Production and Health Paper* 127. Rome, Italy.
- Shackelford, A.K., Davis, C.H., 2003a. A hierarchical fuzzy classification approach for high-resolution multispectral data over urban areas. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 41, 1920–1932. doi:10.1109/TGRS.2003.814627
- Shackelford, A.K., Davis, C.H., 2003b. A combined fuzzy pixel-based and object-based approach for classification of high-resolution multispectral data over urban areas. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 41, 2354–2364. doi:10.1109/TGRS.2003.815972
- Siebert, H., 2008. *Economics of the environment: Theory and policy*, 7th ed. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, Germany.
- Snow, C.P., 2012. *The two cultures*, 14th ed. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Spiegelman, J., 2003. Beyond the Food Web Connections to a Deeper Industrial Ecology. *Journal of Industrial Ecology* 7, 17–23. doi:10.1162/108819803766729177
- Squires, G.D., 2002. *Urban sprawl : causes, consequences, & policy responses*. Urban Institute Press, Lanham, USA.
- Steinfeld, H., Mooney, H.A., Schneider, F., Neville, L., 2010. *Livestock in a changing landscape. Volume 1: Drivers, consequences, and responses*. Island Press, Washington D.C.
- Strathman, A., Gleicher, F., Boninger, D.S., Edwards, C.S., 1994. The consideration of future consequences: Weighing immediate and distant outcomes of behavior. *Journal of Personality and Social Psychology* 66, 742–752.
- Szerszynski, B., 2012. The end of the End of Nature: The Anthropocene and the fate of the Human. *Oxford Literary Review* 34, 165–184. doi:https://doi.org/10.3366/olr.2012.0040
- Theys, J., 2010. Trois conceptions irréductibles de l'environnement, in: *Ecologies Urbaines*. Economica, Paris, France, pp. 15–38.
- van Zelm, R., Larrey-Lassalle, P., Roux, P., 2013. Bridging the gap between life cycle inventory and impact assessment for toxicological assessments of pesticides used in crop production. *Chemosphere*. doi:10.1016/j.chemosphere.2013.11.037
- VandeWeghe, J.R., Kennedy, C., 2007. A spatial analysis of residential greenhouse gas emissions in the Toronto Census Metropolitan Area. *Journal of Industrial Ecology* 11, 133–144. doi:10.1162/jie.2007.1220
- Vanier, M., 2009. *Territoires, territorialité, territorialisation : controverses et perspectives*. Presses universitaires de Rennes, Rennes, France.
- Verburg, P.H., Schot, P., Dijst, M., Veldkamp, A., 2004. Land use change modelling: current practice and research priorities. *Geo Journal* 61, 309–324.
- Verburg, P.H., Soepboer, W., Veldkamp, A., Limpiada, R., Espaldon, V., Mastura, S.S.A., 2002. Modeling the spatial dynamics of regional land use: The CLUE-S model. *Environmental Management* 30, 391–405. doi:10.1007/s00267-002-2630-x

- Wachsmuth, D., 2012. Three Ecologies: Urban Metabolism and the Society-Nature Opposition. *The Sociological Quarterly* 53, 506–523. doi:10.1111/j.1533-8525.2012.01247.x
- Wenger, E., 1999. *Communities of practice: Learning, meaning, and identity*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Wezel, A., Bellon, S., Doré, T., Francis, C., Vallod, D., David, C., 2009. Agroecology as a science, a movement and a practice. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 29, 503–515. doi:10.1051/agro/2009004
- Williams, R., 1983. *Keywords: A Vocabulary of Culture and Society*, New York. Oxford University Press, New York. doi:10.1057/9780230373464